INVESTIGACIÓN Y CIENCIA | ¿QUÉ ES UNA PARTÍCULA? | LOS RIESGOS DE LOS MICROPLÁSTICOS | PROTEÍNAS ARTIFICIALES

SEPTIEMBRE 2021 N.º 540

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Septiembre 2021 • N.º 540 • 6,90 € • investigacionyciencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

¿QUÉ ES UNA PARTÍCULA?

INFORME ESPECIAL

En busca de los componentes básicos del universo

CONTAMINACIÓN

Los riesgos de los microplásticos

BIOQUÍMICA

Proteínas artificiales

EVOLUCIÓN HUMANA

La sed, clave en nuestra historia evolutiva

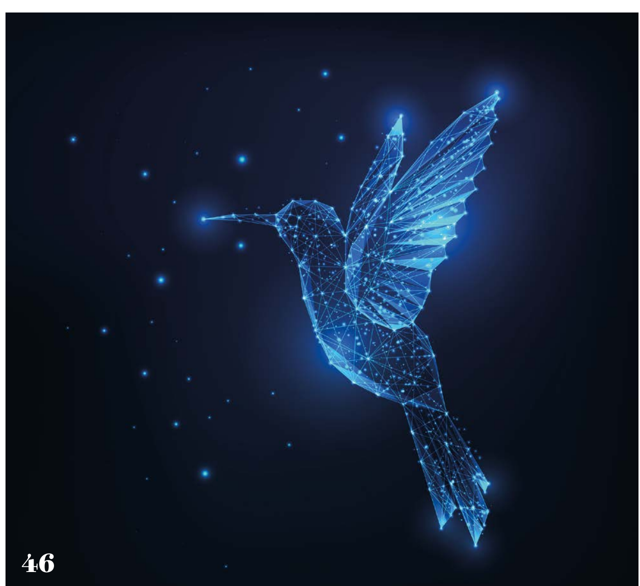




I AM A PHOTOGRAPHER AND AN ARTIST, GETTY IMAGES

ARTÍCULOS


17


46


84

INVESTIGACIÓN Y
CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

Las partículas elementales son los objetos más simples del universo: aquellos a partir de los cuales se compone todo lo demás. A lo largo de los años, sin embargo, estas entidades han recibido múltiples definiciones, desde algunas puramente matemáticas hasta otras operacionales. Ahora, dos líneas de investigación han comenzado a cambiar la manera de pensar en los constituyentes últimos de la naturaleza. Ilustración: Getty Images/gremlin/iStock



redaccion@investigacionyciencia.es



Junio y julio 2021

¿DERECHA O IZQUIERDA?

En el artículo de Kelly Jaakkola «¿Los delfines son diestros o zurdos?» [Investigación y Ciencia, junio de 2021] se exponen varios sesgos relativos a lo que las personas solemos entender por girar «hacia la derecha» o «hacia la izquierda» y se analizan las consecuencias de dichos sesgos en el estudio de la lateralidad en los animales. Para ilustrar las ambigüedades, el artículo emplea el siguiente ejemplo: «Para entender el meollo del asunto, haga lo siguiente: en primer lugar, póngase en pie y gire a la "derecha". Luego, túmbese en el suelo boca abajo y ruede hacia la "derecha". Si actúa como la mayoría de la gente, en el primer caso el hombro derecho se desplazará hacia su espalda, mientras que en la posición horizontal ese mismo hombro se moverá hacia el pecho, o el lado frontal. Es decir, girará exactamente en el sentido contrario».

Sin embargo, en estas dos situaciones se emplean verbos diferentes: *girar* y *rodar*. Y mientras que el primero induce a pensar en un movimiento en torno a un eje longitudinal central, el segundo hace referencia a un movimiento en torno a un eje longitudinal lateral (el de contacto con la superficie). De hecho, si estoy de pie con la cara contra una pared y me dicen que «ruede» hacia la derecha, ejecutaré el mismo movimiento que si estuviera tumbado en el suelo. Y curiosamente, si estando tumbado boca arriba me indican que ruede hacia la derecha, una vez haya completado media vuelta y esté boca abajo seguiré desplazándome de la misma manera. Pero, si estando boca abajo me indican que ruede hacia la derecha, entonces lo haré en sentido contrario. Por tanto, estar apoyado en una superficie boca arriba o boca abajo cambia lo que entendemos por derecha e izquierda.

José Luis Sendagorta
Bilbao

Responde Jaakkola: *Es cierto que existe una interesante relación entre los distintos verbos empleados para describir los movimientos de giro y nuestra intuición al respecto. Sin embargo, la cuestión que abordábamos en nuestro trabajo publicado en* Behavioural Brain Research *no hacía referencia a palabras concretas ni a superficies físicas: nuestro objetivo era explorar el hallazgo de que varias publicaciones científicas habían clasificado los movimientos de giro de los animales atendiendo a la orientación típica de estos. En concreto, los movimientos en los que el lado derecho del animal se desplaza hacia delante y el izquierdo hacia atrás se habían clasificado como «giros hacia la izquierda» o «en sentido antihorario» en humanos y aves que caminan, pero como «giros a la derecha» o «en sentido horario» en delfines y ballenas. Por tanto, comparar el comportamiento de animales diferentes exige emplear una denominación neutra.*

Las ambigüedades adicionales que señala Sendagorta resaltan aún más la importancia de estas consideraciones, ya que tales ambigüedades desaparecen bajo la nueva nomenclatura introducida en nuestro estudio: un movimiento clasificado como RiFS recibirá siempre dicha denominación con independencia de la orientación del animal, de que este se apoye o no en alguna superficie o de la dirección en que esté mirando.

CIENCIA Y CAUSALIDAD

El artículo de Iñigo de Miguel Beriain y Antonio Diéguez Lucena «¿Explicar o predecir?» [Investigación y Ciencia, julio de 2021] es un excelente resumen de la encrucijada en que se halla el método científico tradicional ante la emergencia de la inteligencia artificial (IA). Sus autores ven en ello un riesgo de abandono de algunas funciones de la ciencia, especialmente en lo que concierne al papel de la teorización y en particular al de la causalidad. No obstante, ¿no sería legítimo considerar que, en vez de ante una limitación del papel del método científico, tal vez nos hallemos ante una ampliación del mismo?

Tal y como se ha entendido hasta ahora, la causalidad solo podía aplicarse a sistemas excesivamente sencillos, los cuales no representan la complejidad de la mayoría de los sistemas reales (organismos, ecosistemas, etcétera). La facultad predictiva de la IA en sistemas complejos podría ayudar a dar un salto conceptual en el entendimiento y la teorización de fenómenos que no consisten en interacciones simples entre unos pocos elementos, sino que dan lugar a complicados efectos de cascada con retroalimentaciones. De ello resultaría un concepto de causalidad de un nivel más alto y una mejora de las teorías actuales de sistemas, lo que enriquecería la metodología científica. Que eso incorpore una componente estadística no debería, en mi opinión, ser un problema, ya que eso ya está perfectamente aceptado en áreas como la física cuántica.

Claude Sibuet
Barcelona

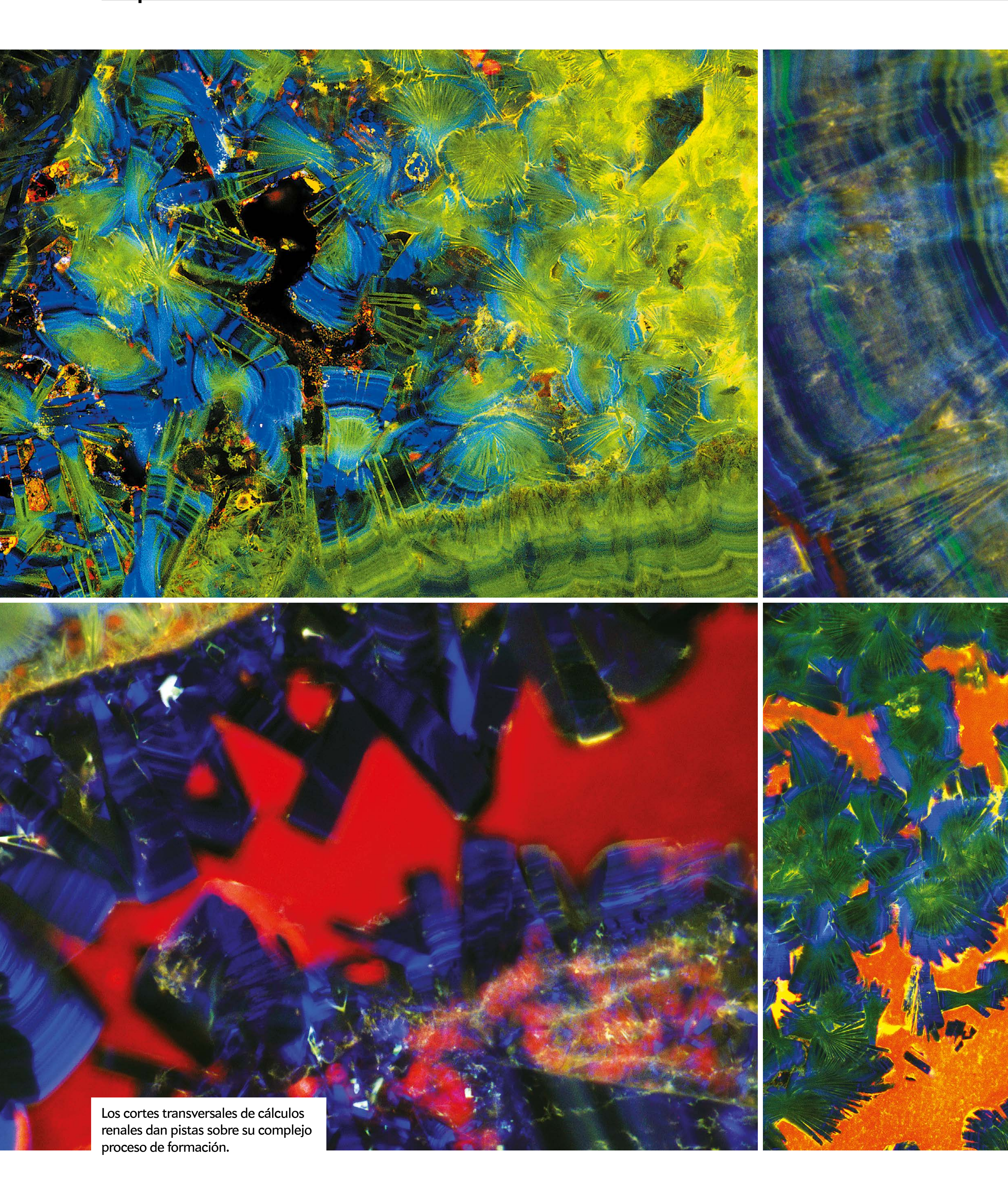
Responden los autores: *La cuestión, a nuestro juicio, ha de centrarse necesariamente en el concepto de causalidad. Lo que Sibuet sugiere es introducir una interpretación más extensa de esta idea que la que solemos adoptar. Esto es posible, claro, pero habría que demostrar que dicho cambio tiene sentido. En nuestra opinión, resulta complicado sostener esta alternativa so pena de diluir demasiado sus fronteras, lo que redundaría en una menor utilidad. Lo que nuestro artículo intenta mostrar es que correlación y causalidad no solo son conceptos diferentes, sino que pueden sugerir distintos cursos de acción. Deshacer el conflicto considerando que ciertas correlaciones equivalen a causas no es, a nuestro modo de ver, la mejor solución. El concepto de causalidad, aunque sea probabilístico, exige algo más que la mera posibilidad de conectar predictivamente fenómenos por medio de algoritmos.*

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:

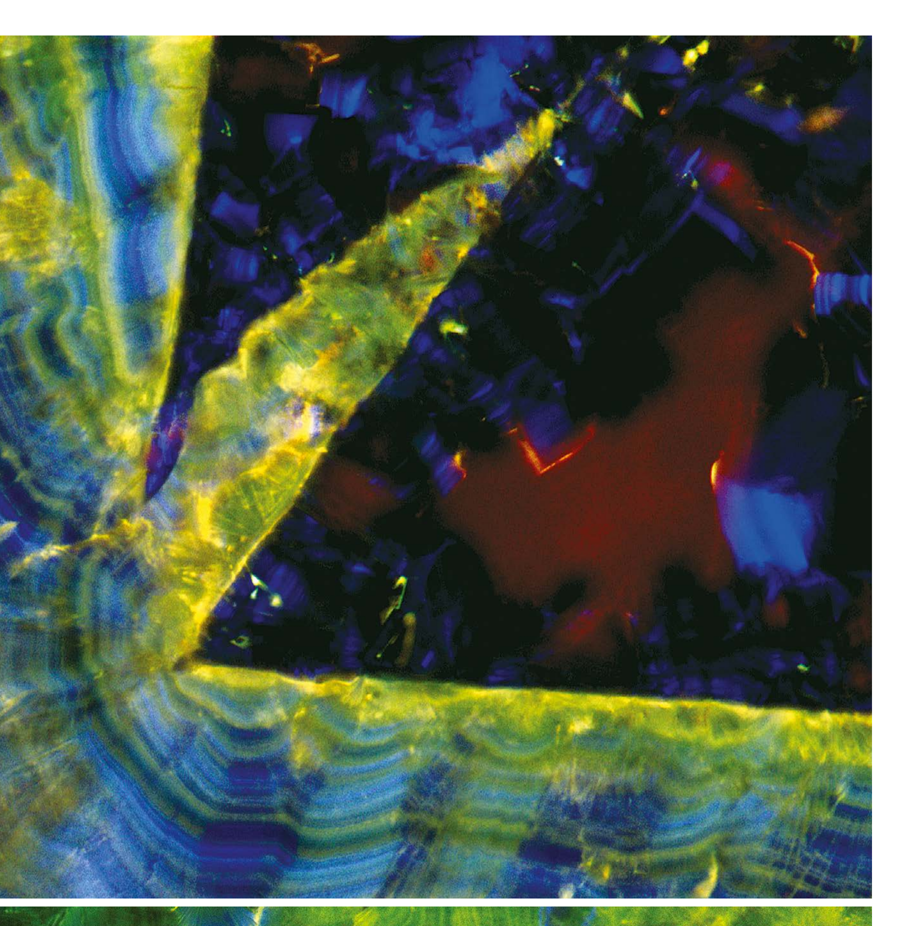
PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Valencia 307, 3.º 2.ª, 08009 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

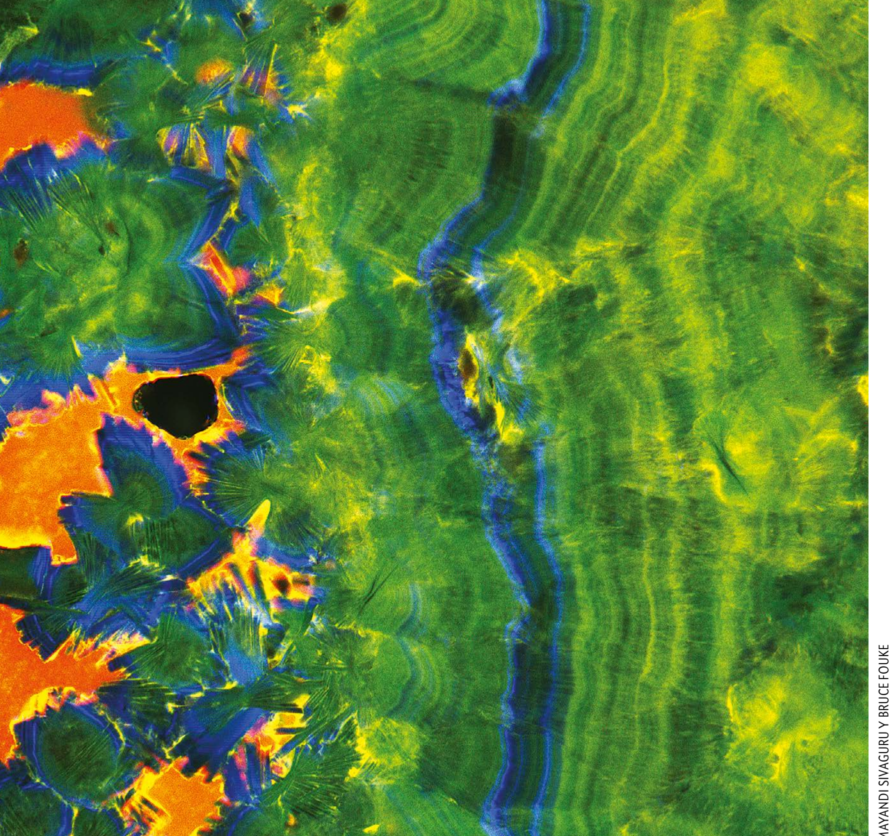
La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



Los cortes transversales de cálculos renales dan pistas sobre su complejo proceso de formación.





MAYANDI SIVAGURU Y BRUCE FOUKE

MEDICINA

Geología de las piedras del riñón

En lugar de cristalizar de una sola vez, los cálculos renales se disuelven y se vuelven a formar una y otra vez

Los investigadores médicos están preparados para cartografiar por primera vez el proceso entero de formación de los cálculos renales gracias a una perspectiva muy singular, la que ofrece la ciencia de la geología. Combinando este marco con una serie de instrumentos punteros de microscopía y un nuevo artefacto que crea cálculos artificiales en el laboratorio, están ideando modos nuevos para detener o frenar el crecimiento de los cálculos.

La litiasis renal aparece por la formación de cristales minerales dentados en la orina acumulada en el riñón. Este problema insoportable afecta a uno de cada 11 adultos y sigue en alza, sobre todo entre las mujeres y los adolescentes. «Es frecuente, debilitante y costoso, tanto para el afectado como para el sistema sanitario. Para colmo, también es recurrente: cuando se sufre uno, hay alrededor de un 50 por ciento de posibilidades de que se repita pronto», afirma la uróloga Margaret Pearle, que trata la litiasis en el Centro Médico del Sudoeste de la Universidad de Texas y que no ha participado en la nueva investigación.

Hace una década, el geólogo marino Bruce Fouke giró el objetivo de su microscopio desde los arrecifes coralinos hacia los cálculos renales. En colaboración con biólogos y médicos de la Clínica Mayo y la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, descubrió que los cálculos de riñón se forman de modo similar a muchas otras piedras en la naturaleza: se disuelven y se vuelven a formar repetidas veces, en lugar de cristalizar de una sola vez. «En ese momento nos dimos cuenta de que son bastante dinámicos y tienen fases en que se están disolviendo, así que debe de haber algún modo de aprovechar esa fase de disolución para tratarlos», afirma la colaboradora de Fouke Amy Krambeck, uróloga la Escuela de Medicina de la Universidad Northwestern.

No hay muchos modelos de laboratorio o en animales que permitan estudiar la formación de los cálculos renales, asegura Krambeck. Así que el equipo ha creado un nuevo dispositivo llamado GeoBioCell, un cartucho diseñado para imitar las intrincadas estructuras internas del riñón. Permite medir y averiguar de qué modo diversos factores, tales como la actividad de las células renales, así como el microbioma, la bioquímica y el flujo de orina, afectan al crecimiento de los cálculos. La variación de cualquier factor hace que estos crezcan y se disuelvan de modo distinto.

En su reciente trabajo, resumido en *Nature Reviews Urology*, los investigadores usaron el GeoBioCell para estudiar el crecimiento de los cristales de oxalato cálcico, que constituyen en torno al 70 por ciento de los cálculos renales. Hasta el trabajo preliminar de Fouke se pensaba que era casi imposible que ese tipo de cristales se disolviera, pero él y sus colaboradores descubrieron que, en realidad, los cálculos se disuelven parcialmente en el cuerpo antes de volver a crecer. El GeoBioCell les permite examinar con precisión la formación de los cálculos y esperan descubrir modos de iniciar o prolongar la fase de disolución con fármacos. También están usando el nuevo ingenio para ensayar con diversas proteínas (entre ellas la osteopontina, vinculada con el tejido óseo) que, administradas como un fármaco, podrían inhibir el crecimiento de los cálculos. Además, están explorando la influencia que podrían tener en su desarrollo ciertos microorganismos y comunidades microbianas.


Corte de cálculo renal

Esta investigación tiene grandes posibilidades de identificar los procesos renales a los que podrían dirigirse los fármacos u otras intervenciones, asegura Pearle, y a la larga mejorará la capacidad de predicción y tratamiento de los cálculos recurrentes.

—*Harini Barath*


Jejenero de corona castaña estudiado en la selva peruana.

ORNITOLOGÍA

Ojos de aves y cambio global

El tamaño del globo ocular podría revelar la vulnerabilidad a la destrucción del hábitat

A la mayoría de las aves los ojos les resultan esenciales para la vida aérea. Les permiten ejecutar maniobras acrobáticas en una fracción de segundo entre el denso ramaje, o localizar con precisión en la distancia a los depredadores o las presas. Pero cuando los ornitólogos han estudiado su adaptación a este mundo en rápido cambio, han pasado por alto el tamaño del ojo en favor de rasgos como la envergadura de las alas o la forma del pico. Ahora, un conjunto de medidas de los globos oculares tomadas en el pasado ofrece una visión nueva de estos animales.

En 1982, Stanley Ritland, estudiante de posgrado de la Universidad de Chicago, examinó especímenes de museo conservados en formol y midió minuciosamente los globos oculares de casi 2800 especies, un tercio de todas las aves terrestres. Nunca publicó esos datos, pero Ian Ausprey, otro estudiante del Museo de Historia Natural de Florida, les ha vuelto a echar un vistazo. El análisis de Ausprey, publicado en *Proceedings of the Royal Society B*, coincide con trabajos previos en Perú que indican que las aves de ojos pequeños se adaptan mejor a los hábitats cambiantes.

«Hallamos fuertes correlaciones entre el tamaño ocular, el tipo de hábitat que ocupan las aves, sus hábitos de búsqueda de alimento y el lugar del mundo donde viven», afirma Ausprey. Las mediciones de Ritland ilustran una relación inversa entre las dimensiones del ojo y el área de distribución. Las aves de ojos pequeños tienden a ser migratorias y a viajar a través de numerosos hábitats; las de ojos grandes viven en áreas más localizadas, se concentran alrededor del ecuador, a menudo envueltas por la densa cubierta selvática. El estudio postula que las aves de ojos pequeños se adaptan sin problemas a niveles de luz variables durante sus viajes, mientras que las de ojos grandes luchan contra el deslumbramiento fuera de sus dominios boscosos, inmersos en la penumbra.

Ausprey ya había observado esta tendencia en los bosques nubosos de las montañas de Perú. En esos puntos calientes de biodiversidad, explica, «el tamaño ocular aparece estrechamente relacionado con la respuesta [de las aves] a las perturbaciones causadas por la agricultura». Las de ojos voluminosos tienden a desaparecer de las zonas agrícolas y desforestadas, con mucha luz; las de ojos chicos se adaptan. El nuevo estudio amplía las observaciones de Ausprey en Perú y aporta una mayor variedad de aves de otros lugares, entre ellos loros, pitos y pinzones.

Allison Shultz, ornitóloga en el Museo de Historia Natural del Condado de Los Ángeles, ajena a la investigación, lo alaba por subrayar la importancia que la exposición a la luz tiene para las aves. Ella misma ha descubierto un vínculo entre la coloración del plumaje y la luz ambiental, y espera que las futuras investigaciones analicen de qué modo la contaminación lumínica y la desforestación podrían estar modelando los ojos de las aves. «Me resultaría muy curioso comprobar si los ojos evolucionan para adaptarse mejor a los nuevos entornos, más luminosos», añade.

Ausprey cree que el estudio recalca la importancia de conservar los entornos con distintos niveles de luz, sobre todo los fragmentos de selvas densas, como medio para proteger de la pérdida de hábitat a las aves con ojos de cualquier tamaño.

—*Jack Tamisiea*

MAYANDI SIVAGURU Y BRUCE FOUKE (*cálculo renal*); IAN AUSPREY Y MUSEO DE HISTORIA NATURAL DE FLORIDA (*pájaro*)

Vuelos espaciales tripulados (1961-2020)

A finales de 2020, los seres humanos habíamos salido al espacio (cuyo límite hemos fijado a 80 kilómetros sobre el nivel del mar) en 343 ocasiones. Aquí se muestran todas ellas mediante arcos cuyo color indica el tipo de nave. Se incluye cualquier vuelo tripulado que superase los 80 kilómetros de altitud, tanto aviones espaciales como misiones lunares.

La orientación del arco indica el tipo de agencia espacial

Empresas privadas
Arco hacia la derecha

Programas gubernamentales
Arco hacia la izquierda

El color denota el tipo de nave

La altura del arco señala el destino de la misión

Espacio profundo
Más de 2000 km

Órbitas bajas
250-2000 km

Suborbital
80-250 km

Actividad privada

Los aviones espaciales de Virgin Galactic cruzaron la frontera del espacio a principios de siglo. Hoy, SpaceX y Boeing desarrollan programas que pondrán en órbita a astronautas y turistas.

Dragon
SpaceX

SpaceShipOne*
Unity
Virgin Galactic

Primeros vuelos

Antes de que las estaciones espaciales ofrecieran un destino, las naves rozaban el límite del espacio (como en los vuelos suborbitales del avión-cohete X-15) o rodeaban el planeta antes de regresar a la superficie.

Ambiciones lunares

China y la India han desarrollado programas espaciales gubernamentales (incluida una estación espacial china, cuyo montaje en órbita acaba de comenzar) con la Luna en el punto de mira. La India aún no ha lanzado astronautas, pero el programa Shenzhou ha puesto en órbita seis misiones tripuladas.

Lapsos sin transbordador

Los desastres del Challenger y el Columbia suspendieron temporalmente los lanzamientos.

Shenzhou
China

Mercury X-15 Gemini Apolo Skylab Transbordador
EE.UU.

Vostok Vosjod Soyuz
URS y Rusia

1960 1970 1980 1990 2000 2010 2020

La Soyuz, incansable

Desde su primer vuelo en 1967, estas naves rusas han puesto astronautas en órbita en 143 ocasiones, lo que supone el 40 por ciento de todos los vuelos tripulados. Se mantienen seguras y eficaces gracias a las mejoras de diseño, aunque siguen siendo cápsulas de un solo uso.

FUENTE: «JSR LAUNCH LOGS», POR JONATHAN C. MCDOWELL EN PLANET4589.ORG *(datos a fecha 2 de abril de 2021)*; KATIE PEEK *(gráfico)*

ESPACIO

La nueva frontera final

Los vuelos espaciales tripulados se diversifican

El envío de personas al espacio está entrando en una nueva era. Tras el programa lunar Apolo, los transbordadores espaciales estadounidenses y las naves rusas Soyuz quedaron como las únicas opciones para llevar astronautas a las órbitas bajas —donde aguardaban estaciones espaciales como Skylab, la Mir o la ISS— y traerlos de vuelta. Hoy existen muchas más lanzaderas y destinos, señala Jonathan C. McDowell, astrónomo del Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard. SpaceX, Boeing y otras empresas privadas están comenzando a despegar y planean efectuar vuelos tanto con astronautas como para turistas. Al mismo tiempo, viajar al espacio profundo vuelve a estar en el horizonte de la NASA. «Después del transbordador se abrió un largo paréntesis en los vuelos espaciales tripulados de EE.UU.», apunta McDowell. «Eso ya es historia.»

—*Katie Peek*

* La nave SpaceShipOne fue fabricada por la empresa Scaled Composites, la cual se asoció después con Virgin Galactic.

CONTAMINACIÓN

Eliminar microplásticos

¿Podría lograrse con microrrobots?

Los microplásticos, fragmentos minúsculos y difíciles de degradar de fibras textiles, botellas de agua y otros productos sintéticos, se han abierto camino hasta el aire, el agua y el suelo de todo el mundo. Ahora, una nueva investigación publicada en *ACS Applied Materials & Interfaces* ha demostrado una manera de inducir su descomposición, al menos en el agua, usando ciertos microrrobots aún más pequeños. Al añadirlos al agua junto con peróxido de hidrógeno, estos dispositivos del tamaño de una bacteria se adhieren a las partículas de los microplásticos y comienzan a fragmentarlas.



Microrrobot

Los microrrobots en cuestión son metálicos, tienen forma de estrella de cuatro puntas y se hallan recubiertos de partículas magnéticas. La exposición a la luz visible hace que sus electrones absorban energía y reaccionen con el agua y el peróxido de hidrógeno en un proceso denominado fotocatálisis. Como resultado, los robots se mueven. «Barren un área mucho mayor que la que se podría abarcar con una técnica estática», explica Martin Pumera, investigador de la Universidad de Química y Tecnología de Praga y coautor del estudio. Cuando los microrrobots se fijan al plástico, la fotocatálisis también produce moléculas cargadas que rompen los enlaces químicos de las moléculas del plástico, de modo similar a como un joyero corta los eslabones de una pulsera.

Los investigadores probaron los microrrobots con cuatro tipos de plástico. Al cabo de una semana, los cuatro habían comenzado a degradarse y habían perdido entre el 0,5 y el 3 por ciento de su masa. En otro experimento, los microrrobots se autopropulsaron a través de un pequeño canal. Un imán diminuto sirvió para recoger los dispositivos, que arrastraron consigo hasta el 70 por ciento de las partículas de los microplásticos.

Pumera prevé liberar futuras versiones de los robots en el mar para que se adhieran a los microplásticos, y luego recuperar los dispositivos a fin de reutilizarlos. No obstante, según Win Cowger, experto en contaminación por plásticos de la Universidad de California en Riverside que no tomó parte en el estudio, es probable que este tipo de dispositivos solo resulten útiles en sistemas cerrados, como los empleados para tratar el agua potable o las aguas residuales. El experto señala que los robots actuales pueden adherirse a otras sustancias aparte del plástico, y que tal vez no fuera seguro liberar grandes cantidades de ellos en el agua. A fin de resolver ambos problemas, el equipo de Pumera está probando microrrobots fabricados con otros materiales, los cuales también podrían funcionar sin peróxido de hidrógeno.

«El trabajo es sin duda es muy interesante, pero hace falta más investigación para convertirlo en una técnica realmente viable, atractiva y capaz de lidiar con la enorme escala del problema», señalan Peter Edwards y Sergio González-Cortés, químicos de la Universidad de Oxford ajenos al estudio. En el pasado, ambos investigadores han propuesto usar radiación de microondas para descomponer los residuos plásticos. Por ahora, concluye Cowger, «la mejor manera de eliminar los microplásticos del ambiente es evitar que lleguen allí».

—Scott Hershberger

BIOLOGÍA

El horario de los experimentos

Despertar los ratones durante nuestras horas de vigilia podría estar sesgando las investigaciones

Los ratones son animales eminentemente nocturnos. Pero un nuevo análisis indica que los científicos suelen someterlos a pruebas durante el día, lo que podría alterar los resultados y crear variabilidad entre las investigaciones si solo registran información diurna.

De los 200 artículos examinados en el nuevo estudio, más de la mitad no comunicaron el horario de las pruebas de comportamiento o lo hicieron de manera ambigua. Solo el 20 por ciento notificó que eran nocturnas. El análisis se ha publicado en *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*.

El neurocientífico de la Universidad de Virginia Occidental Randy Nelson, autor principal del estudio, afirma que probablemente sea una cuestión de conveniencia humana. «Es más sencillo poner a trabajar a los estudiantes y los centros de investigación por el día que por la noche», explica Nelson. Pero esa comodidad tiene un coste.

«El momento del día no solo incide en la intensidad de muchas variables, como la actividad locomotora, el comportamiento agresivo y los niveles de hormonas en la sangre», sino que los cambios en esas variables solo pueden observarse durante ciertas partes del ciclo diurno, afirma William D. Todd, neurocientífico del comportamiento de la Universidad de Wyoming. Esto significa que «no comunicar el momento del día en que se recogen los datos y se hacen las pruebas dificulta mucho la interpretación de los resultados», añade Natalia Machado, científica del Centro Médico Deaconess Beth Israel. Ni Todd ni Machado han participado en el nuevo estudio.

Los autores de este afirman que es esencial que los científicos comuniquen los horarios de su trabajo y tengan en cuenta el hecho de que el comportamiento y las respuestas fisiológicas de los roedores pueden variar según la hora. Como primer paso, Nelson afirma que «prestar atención al momento del día es algo al alcance de todos, de cara a mejorar la fiabilidad, la reproducibilidad y el rigor de las investigaciones en neurociencia del comportamiento».

El psicólogo de la Universidad de Calgary Michael Antle, que no ha participado en los análisis, afirma que esas diferencias en la ejecución de los estudios están contribuyendo a generar una «crisis de reproducibilidad» en ciencia, con otros laboratorios incapaces de obtener los mismos resultados en los estudios. «Realizar un experimento en el momento equivocado nos puede llevar a pasar por alto un descubrimiento», advierte.

—Jillian Kramer

FUENTE: «A MAZE IN PLASTIC WASTES: AUTONOMOUS MOTILE PHOTOCATALYTIC MICROROBOTS AGAINST MICROPLASTICS», SEYYED MOHSEN BELADI-MOUSAVI ET AL. EN *ACS APPLIED MATERIALS & INTERFACES*, VOL. 13, PÁGS. 25102-25110, JUNIO DE 2021 (*microrrobot*). THOMAS FUCHS (*ratón*)

LINGÜÍSTICA

Sonidos universales

Muchas vocalizaciones recién creadas se entienden bien en distintas culturas

Algunos gestos, como señalar para dirigir la atención de alguien, se comprenden bien en cualquier lugar del planeta. Ahora, una nueva investigación ha demostrado que lo mismo ocurre con ciertas vocalizaciones, las cuales pueden ser icónicas y reconocibles para personas de todo el mundo, incluso cuando el hablante no se limita a imitar un sonido muy conocido. El hallazgo, publicado en *Scientific Reports*, podría ayudar a explicar la aparición del lenguaje hablado moderno.

En 2015, dos de los autores del nuevo trabajo retaron a algunos angloparlantes a inventar sonidos que representaran varios conceptos sencillos, como «dormir», «niño», «carne» o «roca». Cuando otras personas anglófonas escucharon esos sonidos e intentaron relacionarlos con los conceptos, obtuvieron muy buenos resultados. Sin embargo, los investigadores querían averiguar si tales vocalizaciones también resultaban comprensibles para otras culturas, señala Marcus Perlman, científico cognitivo de la Universidad de Birmingham y coautor del estudio.

A tal fin, Perlman y sus colaboradores realizaron experimentos en línea y presenciales en siete países, desde Marruecos hasta Brasil. Reclutaron a más de 900 participantes que hablaban un total de 28 idiomas, les propusieron que escucharan las vocalizaciones que mejor se habían entendido en el estudio de 2015, y después que eligieran los conceptos correspondientes de entre un conjunto de palabras o imágenes. Las vocalizaciones que evocaban sonidos conocidos, como el goteo del agua, fueron las que mejor funcionaron. Pero muchas otras se entendieron también en el resto de los idiomas con resultados muy superiores a los que se habrían obtenido respondiendo al azar. «La tasa de acierto fue notable más allá de las onomatopeyas», asegura Perlman.

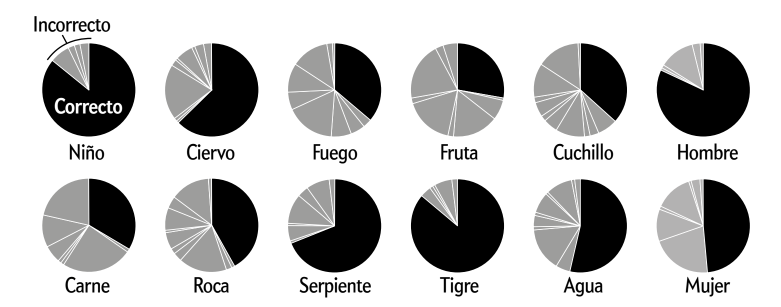
Es probable que eso se deba a que ciertos patrones acústicos son universales, indica el equipo. Por ejemplo, los sonidos cortos y básicos a menudo transmiten el concepto de «uno», mientras que los repetidos suelen asociarse con «muchos». Asimismo, los sonidos graves denotan algo grande y los agudos sugieren un tamaño reducido. Este hallazgo de «sonidos icónicos» podría ayudar a entender el modo en que nuestros ancestros comenzaron a emplear una comunicación acústica rica, afirma la coautora Aleksandra Ćwiek, lingüista del Centro Leibniz de Lingüística General de Berlín. La voz humana, sostiene, «podría ofrecer la iconicidad suficiente para poner en marcha el lenguaje».

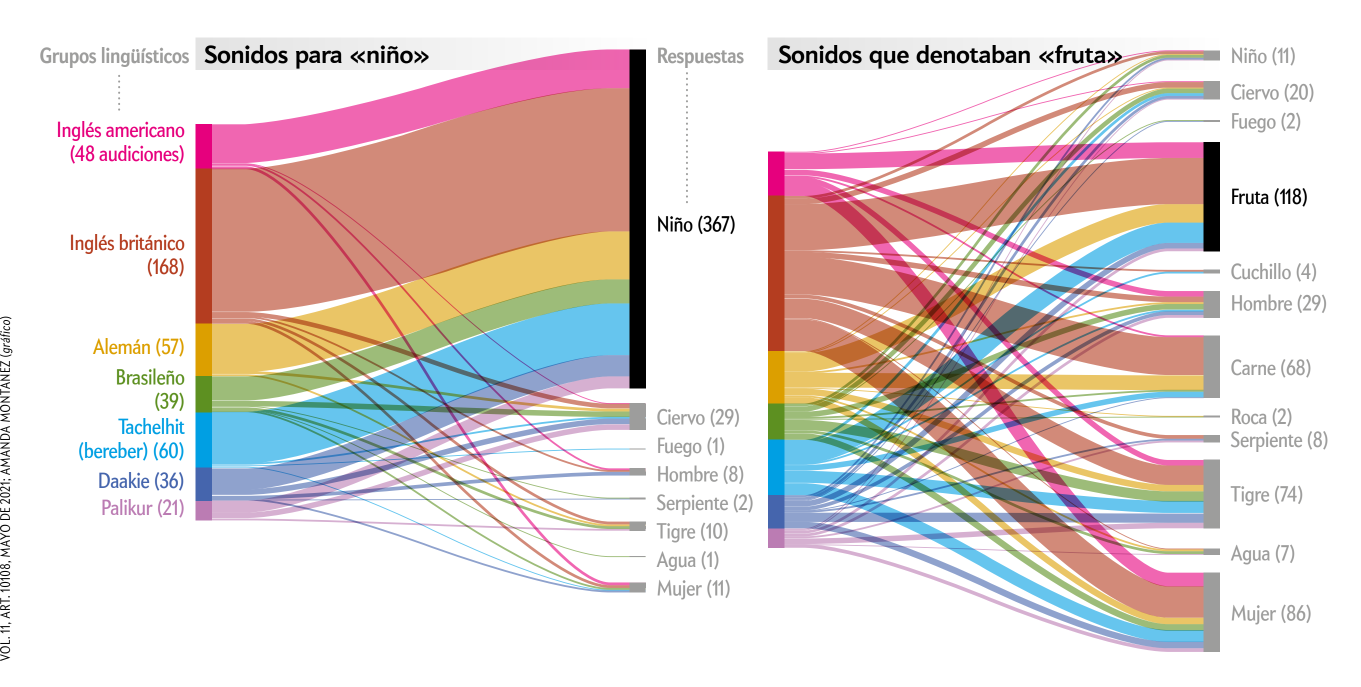
Matthias Urban, lingüista de la Universidad de Tubinga ajeno a la investigación, coincide en esa apreciación. «No está claro cómo surgieron las palabras», subraya, por lo que las vocalizaciones icónicas sugieren «una vía que podría haber contribuido».

—Katherine Kornei

Resultados de los experimentos presenciales

En la parte presencial del estudio participaron 429 personas de 7 grupos lingüísticos. Escucharon varios sonidos y trataron de adivinar el significado de cada uno, seleccionándolo de entre un conjunto de 12 imágenes. Los investigadores usaron tres sonidos distintos para representar cada significado y les indicaron que era posible asociar más de un sonido a cada imagen. Los sonidos que denotaban «niño» fueron los que generaron más respuestas correctas. Los que representaban objetos inanimados, como «fruta», arrojaron resultados dispares.





FUENTE: «NOVEL VOCALIZATIONS ARE UNDERSTOOD ACROSS CULTURES», ALEKSANDRA ĆWIEK ET AL. EN *SCIENTIFIC REPORTS*, VOL. 11, ART. 10108, MAYO DE 2021; AMANDA MONTAÑEZ (*gráfico*)

BIOLOGÍA

Freno a la diabrótica

Se consigue detener esta plaga del maíz, que percibe el CO_2 emitido por las raíces

La diabrótica del maíz es un escarabajo que apenas alcanza el tamaño de un grano de arroz. Pero este discreto insecto ataca a los maizales (en Estados Unidos, provoca daños que ascienden hasta los mil millones de dólares al año). Las larvas son especialmente problemáticas; invisibles, se adentran en el suelo y taladran las raicillas del maíz.

Los gusanos encuentran las apetecibles raíces detectando los gases del subsuelo y otras sustancias, explica Ricardo Machado, ecólogo químico en la Universidad de Neuchâtel, en Suiza. Los investigadores sabían que les atrae el dióxido de carbono, que las raíces del maíz desprenden como subproducto de la respiración. Pero Machado espera ayudar a desarrollar mejores estrategias de control de plagas indagando el modo en que las larvas se sirven del CO_2 y de otras señales para localizar las raíces.



Larva de diabrótica del maíz (*Diabrotica virgifera*).

Él y sus colaboradores recurrieron a la técnica del ARN de interferencia (ARNi) para llegar a la raíz del problema. Recubrieron plántulas de maíz con una solución que contenía un ARN bicatenario específico para que las larvas las devorasen, lo que detuvo la expresión del gen que codifica los receptores de CO_2 de las diabróticas y les impidió oler el gas.

El equipo describe en un artículo publicado en *eLife* que los nuevos gusanos insensibles al CO_2 ya no pudieron localizar las raíces del maíz desde más de nueve centímetros de distancia; desde más cerca podían seguir oliéndolas aunque no percibiesen el gas. Según Machado, esa capacidad indica que son capaces de captar otros rastros olorosos para acotar su búsqueda, una exhibición espectacular de los recursos de estas humildes larvas para alcanzar su objetivo.

Elisabeth Eilers, ecóloga química en la Universidad de Bielefeld, en Alemania, afirma que, si bien la sensibilidad al CO_2 ya se había observado antes en la diabrótica, identificar e inactivar el gen res-

MICROBIOLOGÍA

Colores vivientes

Bacterias corrientes segregan colorantes atóxicos

Un equipo de investigación ha conseguido modificar una bacteria común para que segregue un arcoíris de colorantes con aplicaciones en alimentación, textiles, cosmética, etcétera. En este estudio demostrativo preliminar también se detalla por primera vez la producción natural de dos colores: el verde y el azul marino.

Algunos tintes se fabrican de forma natural a partir de plantas. Por ejemplo, el índigo se extrae de las hojas de plantas del género *Indigofera*, pero el proceso es costoso y laborioso. Las alternativas sintéticas a veces exigen el uso de precursores o subproductos que son tóxicos, que pueden ser liberados como contaminantes. Y los consumidores están dispuestos a pagar más por colorantes naturales, afirma Sang Yup Lee, químico e ingeniero biomolecular del Instituto de Ciencias y Técnicas Avanzadas de Corea. Así que él y sus colaboradores se dispusieron a genomodificar bacterias *Escherichia coli* para que fabricasen siete tintes naturales.



No solo tuvieron que retocar los microbios añadiendo genes específicos para que produjeran los tintes, sino que también los ayudaron a segregar los colores. Como los colorantes contienen tintes que son hidrófobos, normalmente no pueden atravesar la membrana celular de las bacterias, así que se acumulan en el interior de la célula y acaban matándola. Este problema ha frustrado desde hace mucho tiempo los intentos de los investigadores de biología sintética por producir «fábricas celulares» autosostenibles de productos químicos.

Lee y su equipo alteraron genéticamente sus *E. coli*, primero para obtener células más largas y después para convertir una parte de la superficie de membrana así ganada en sacos que envolviesen y expelieran las sustancias acumuladas. En lugar de recortar y eliminar los genes pertinentes, lo que en determinadas circunstancias podría matar las bacterias, introdujeron pequeñas secuencias de ARN que silenciaron esos genes no deseados pero esenciales. También insertaron un gen humano que hace que las bacterias formen bolsas microscópicas en su membrana para aumentar aún más la superficie de

PATRICK CAVAN BROWN (*larva*); THOMAS FUCHS (*colores*)

Erratum corrige

En el artículo **Probióticos para salvar el coral** [por Elizabeth Svoboda; Investigación y Ciencia, julio de 2021], se indica que los arrecifes coralinos cubren unos 285.000 millones de kilómetros cuadrados. La cifra correcta es 285.000 kilómetros cuadrados. Agradecemos a nuestro lector José M. Merino Azcárraga por habérnoslo advertido.

Este error ha sido corregido en la edición digital del artículo.

ponsable es especialmente revelador. «Han ahondado en ese sistema mucho más de lo que nadie había hecho hasta el momento», afirma Eilers, ajena al estudio. Destaca que numerosos experimentos someten a prueba las preferencias y las capacidades sensoriales manipulando el cuerpo del insecto, como recortando partes de las antenas. Según ella, el nuevo método «es más directo y elegante que extirpar pedazos del insecto».

El CO_2 tal vez desempeñe un papel importante como atrayente de la diabrótica, «pero las raíces emiten una amplísima variedad de compuestos», aclara Eilers. Se pregunta cómo el gusano puede usar esos otros compuestos delatores, una cuestión que Machado planea investigar en breve silenciando más genes.

Desde el punto de vista de la larva, su capacidad de detección subterránea es un salvavidas: le ahorra un tiempo precioso en la búsqueda de alimento. «Si un insecto pasa dos días buscando comida, es como si nosotros le dedicásemos 20 años», compara Machado.

—Tess Joosse

---

esta. El proceso completo aparece descrito en *Advanced Science*.

Lee afirma que su método de producción con *E. coli* no genera sustancias tóxicas y se podría incorporar a la industria hoy mismo, aunque «algunos colores serán más caros porque las concentraciones siguen siendo bastante pequeñas y son difíciles de producir».

Algún día la nueva técnica podría ayudar a modificar los microbios para que produzcan antibióticos hidrófobos, afirma Meta Kuehn, bioquímica de la Universidad Duke que no ha participado en la investigación. «Sería un avance formidable, ya que permitiría producir algunos antibióticos realmente difíciles de sintetizar», explica.

Lee ha trabajado en ingeniería metabólica durante 26 años y describe esos colorantes textiles y alimentarios como sus últimas correrías en la producción química industrial, que también ha incluido la fabricación de compuestos empleados en cosmética y farmacia. Una broma recurrente de sus colegas, añade con una sonrisa, es que pretende producir todos los compuestos químicos de un catálogo de laboratorio.

—Maddie Bender

CALENTAMIENTO GLOBAL

El cambio climático pone freno a la agricultura

El impacto climático de las emisiones de carbono ha decelerado la productividad agrícola y ganadera en todo el mundo. El daño equivale a la pérdida de todas las mejoras en productividad logradas durante los últimos siete años

ARIEL ORTIZ-BOBEA



FRENO CLIMÁTICO: Maíz deteriorado debido a los efectos de una larga sequía en una plantación del sur de Wisconsin.

GETTY IMAGES/WAKR10/ISTOCK

Vivimos en una era de abundancia agrícola sin precedentes. Mientras que entre 1961 y 2015 la población mundial aumentó en un 140 por ciento, en el mismo período la producción agrícola lo hizo en un 250 por ciento. Buena parte de ese crecimiento se explica por un incremento en el uso de insumos (tierras, plaguicidas, abonos, etcétera), pero cada vez más se debe a los aumentos en la productividad; es decir, a la capacidad de obtener más productos con los mismos insumos gracias al desarrollo de nuevas técnicas. Sin embargo, la agricultura se enfrenta a retos ambientales crecientes, entre ellos el cambio climático.

La agricultura siempre ha dependido de manera fundamental del clima, el cual se encarga de proporcionar la temperatura y el agua necesarias para mantener los cultivos y el ganado. Sin embargo, en un contexto de cambio climático acelerado, este vínculo se torna vulnerable. Y aunque las proyecciones del clima futuro han dado mucho que hablar, es importante subrayar que el clima ya ha cambiado: hoy, las temperaturas globales son un grado centígrado superiores a las de la época preindustrial. El consenso científico al respecto es rotundo e indica que la causa principal de dicho calentamiento es la emisión de gases de efecto invernadero provenientes de la quema de combustibles fósiles.

Si la agricultura depende de manera tan íntima del clima y este ya ha cambiado, una pregunta natural es qué impacto ha ejercido ya el cambio climático en la agricultura mundial. Algunos estudios han establecido que el calentamiento global ha decelerado la producción de ciertos cultivos importantes, como los cereales. Sin

embargo, estos solo representan el 20 por ciento del valor económico de la producción agrícola y ganadera mundial, por lo que no ofrecen un panorama completo.

En un trabajo publicado en *Nature Climate Change*, nuestro grupo de investigación se propuso cuantificar el impacto histórico del cambio climático en el conjunto de la agricultura y ganadería mundiales; un proyecto que ha requerido la participación de un equipo interdisciplinar de economistas, climatólogos y ecólogos. Nuestros resultados muestran que los cambios antropogénicos en el clima han frenado la productividad agrícola y ganadera. Dicho efecto no es menor: en las últimas seis décadas, equivale a haber perdido todo el aumento de la productividad logrado durante los últimos siete años. El fenómeno pone de manifiesto que los efectos perjudiciales del cambio climático ya han comenzado y subraya la necesidad de adaptar cuanto antes la agricultura mundial a un contexto de clima cambiante.

Aislar el efecto del clima

Establecer el impacto histórico del cambio climático en la agricultura y la ganadería no supone una tarea sencilla. A diferencia de los efectos físicos del calentamiento, como el deshielo de los glaciares, sus consecuencias en la economía resultan mucho más difíciles de identificar, ya que en ella intervienen un sinnúmero de factores ajenos al clima. Por tanto, cuantificar el impacto del cambio climático en la agricultura requiere usar métodos que nos permitan descomponer las distintas variables.

Podemos ilustrar el reto con una analogía sencilla. Supongamos que deseamos cuantificar el efecto de la temperatura en la velocidad de un grupo de ciclistas. En la marcha de un corredor influyen todo tipo de causas además de la temperatura, desde la pendiente del terreno hasta la altitud, el viento o el entrenamiento. Por tanto, una manera ingenua de analizar la cuestión sería comparar la velocidad de ciclistas en climas fríos con la de otros en climas más cálidos. Esta estrategia resulta problemática, ya que es probable que existan diferencias entre ambos grupos más allá del clima. Por ejemplo, uno de los grupos puede estar de media más entrenado que el otro, lo que nos llevaría a confundir el efecto del entrenamiento con el de la temperatura.

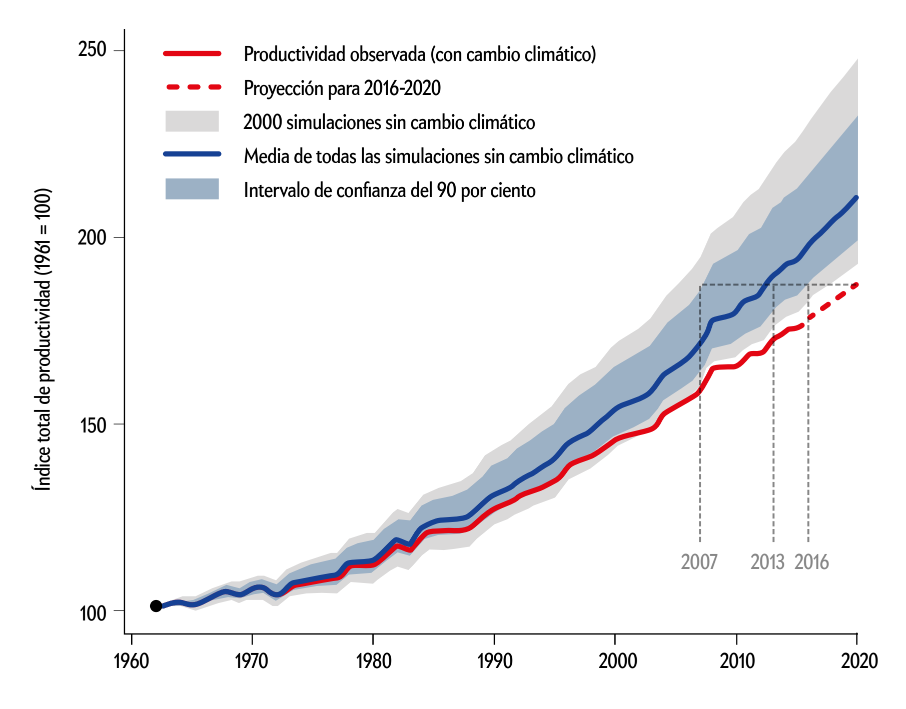
Un método más riguroso consistiría en comparar la velocidad del mismo grupo de ciclistas en días diferentes, unos más fríos y otros más cálidos. Esta estrategia nos permite discernir los efectos de la temperatura y los del entrenamiento porque, mientras que estos últimos se reflejan de manera gradual en el rendimiento del deportista, los cambios en la temperatura son aleatorios de un día para otro. Por tanto, este análisis recrea condiciones similares a las que se darían en un experimento controlado y nos ayuda a aislar de manera estadística la contribución específica de la temperatura en la velocidad de los corredores.

El método empleado en nuestro trabajo fue similar al que acabamos de exponer. Efectuamos un seguimiento de la productividad agrícola y ganadera de 172 países entre los años 1961 y 2015, con el objetivo de establecer cómo variaba dicha productividad en función de los cambios en las condiciones climáticas entre años consecutivos. Nuestros resultados indican que el aumento de la temperatura tiende a desacelerar la productividad, y que lo mismo ocurre cuando los niveles de precipitaciones se tornan muy altos o muy bajos.

Aislar el efecto antropogénico

No obstante, determinar cómo depende la productividad agrícola y ganadera de las variaciones en el clima no basta para establecer el impacto del cambio climático. Esto último exige alguna manera de recrear cómo hubiera sido el estado del clima en «mundos paralelos» con y sin influencias antropogénicas. La respuesta a este problema nos la dan los modelos de circulación general: modelos matemáticos desarrollados por los climatólogos para analizar el comportamiento del clima global a largo plazo. Estos constituyen una pieza clave en climatología y, por ende, en nuestro entendimiento de los factores que afectan al clima terrestre.

Los modelos de circulación general permiten ejecutar simulaciones informáticas con distintos niveles de emisiones de efecto invernadero. Una simulación clave es la «histórica»: aquella que inyecta en el modelo unos niveles de emisiones



CRECIMIENTO MERMADO: Gracias a un modelo econométrico y a un conjunto de simulaciones climáticas, un trabajo reciente ha calculado cómo habría evolucionado la productividad agrícola y ganadera global sin los efectos del cambio climático (*línea azul*). Una comparación con la productividad observada (*rojo*) muestra que, debido al aumento de las temperaturas y a los cambios en el régimen de precipitaciones, la productividad total se ha visto frenada en torno a un 20 por ciento. Dicho efecto equivale, de media, a la pérdida de todas las mejoras de productividad conseguidas desde 2013. El índice de productividad empleado aquí refleja el valor obtenido en agricultura y ganadería por cada unidad de trabajo, tierra, capital y materiales invertidos.

FUENTE: «ANTHROPOGENIC CLIMATE CHANGE HAS SLOWED GLOBAL AGRICULTURAL PRODUCTIVITY GROWTH», ARIEL ORTIZ-BOBEA ET AL. EN *NATURE CLIMATE CHANGE*, VOL. 11, PÁGS. 306-312, ABRIL DE 2021.

idénticos a los observados entre los años 1850 y 2015. Al hacerlo, vemos que, tal y como ocurre en nuestro mundo, las simulaciones muestran un calentamiento global que se acelera a partir de los años ochenta del siglo pasado.

Otra simulación crucial es la «histórica-natural», la cual elimina de la atmósfera las emisiones antropogénicas. Este tipo de simulaciones nos muestran que, si tales emisiones no se hubieran producido, el clima terrestre habría permanecido básicamente estable con respecto a las condiciones preindustriales. Es decir, que casi todo el calentamiento observado en el último siglo y medio es de origen humano.

Así pues, para cuantificar el impacto del cambio climático antropogénico en la productividad agrícola, nuestro trabajo combinó los resultados del modelo econométrico con los de miles de simulaciones climáticas con y sin influencias antropogénicas. Nuestro objetivo era estimar, por un lado, el crecimiento de la productividad agrícola y ganadera en un mundo con emisiones de carbono y, por otro, el mismo fenómeno en un mundo sin dichas emisiones.

Nuestros resultados indican que la productividad agrícola y ganadera sería hoy en torno a un 20 por ciento mayor de no haber sido por el cambio climático. Esta ralentización equivale, de media, a haber perdido los últimos siete años de mejoras técnicas. En concreto, la productividad estimada en 2020 se habría alcanzado ya en 2013 de no haber sido por el cambio climático antropogénico. Retomando el símil ciclista, podemos decir que la agricultura mundial habría llegado «más lejos» (habría producido más con los mismos insumos) en un mundo sin influencias antropogénicas en el clima.

Los mismos datos subrayan también la gran inequidad en los impactos del cambio climático, ya que los efectos negativos afectan de manera desproporcionada a ciertas zonas tropicales de África, América Latina y el Caribe. Regiones que, a su vez, han contribuido muy poco a las emisiones totales de efecto invernadero.

Adaptar la agricultura

Por último, es necesario señalar algunas limitaciones de nuestro análisis. Quizá la mas relevante sea que el estudio solo considera el efecto del cambio climático antropogénico en sí, pero no la eliminación del uso de combustibles fósiles. Esto último es importante porque los combustibles fósiles han contribuido a aumentar nuestro nivel de vida, lo que, a su vez, ha permitido invertir en investigaciones agrícolas que han ayudado a mejorar la productividad. De manera similar, nuestro trabajo no elimina la influencia «fertilizante» del dióxido de carbono. En estudios controlados se ha constatado que este gas resulta beneficioso para algunos cultivos, aunque el efecto resulta mucho más ambiguo en observaciones basadas en la producción real a gran escala.

Nuestro trabajo subraya que el cambio climático no es solo un reto futuro, sino un problema al que ya nos hemos estado enfrentando de manera quizás inadvertida. Los resultados sugieren que reducir las emisiones de carbono tendría consecuencias positivas en la agricultura y la ganadería. Sin embargo, sabemos también que el clima seguirá cambiando durante décadas incluso con descensos considerables en las emisiones. Todo ello pone de relieve la necesidad de adaptar cuanto antes nuestra agricultura a un contexto de cambio climático acelerado. Sin embargo, dado que las inversiones en investigación para lograr esta adaptación solo brindarán sus frutos décadas más tarde, las semillas de esta nueva revolución agrícola deberán sembrarse lo antes posible.

Ariel Ortiz-Bobea *es profesor de economía aplicada y políticas públicas en la Universidad Cornell.*

PARA SABER MÁS

Climate trends and global crop production since 1980. David B. Lobell1, Wolfram Schlenker y Justin Costa-Roberts en *Science*, vol. 333, págs. 616-620, julio de 2011.

Accounting for growth in global agriculture. Keith Fuglie en *Bio-based and Applied Economics*, vol. 4, págs. 201-234, octubre de 2015.

Estimation of the carbon dioxide (CO_2) fertilization effect using growth rate anomalies of CO_2 and crop yields since 1961. David B. Lobell y Christopher B. Field en *Global Change Biology*, vol. 14, págs. 39-45, enero de 2008.

Anthropogenic climate change has slowed global agricultural productivity growth. Ariel Ortiz-Bobea et al. en *Nature Climate Change*, vol. 11, págs. 306-312, abril de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

Crisis alimentarias: ¿una amenaza para la civilización? Lester R. Brown en *IyC*, julio de 2009.

Alimentación sostenible. Jonathan A. Foley en *IyC*, enero de 2012.

Retos del desarrollo agrícola. César Fernández-Quintanilla en *IyC*, abril de 2019.

ASTRONOMÍA

Un debate global sobre las megaconstelaciones de satélites

Los astrónomos buscan que una comisión de las Naciones Unidas discuta los efectos perniciosos de los satélites en las observaciones astronómicas como primer paso para regularlos y reducirlos

ALEXANDRA WITZE

En los últimos dos años, las empresas aeroespaciales han puesto en órbita unos 2000 satélites con el fin de suministrar Internet, lo que casi ha duplicado el número de objetos activos en torno a la Tierra. Eso ha causado desasosiego entre los astrónomos y otros observadores del cielo, preocupados por las interferencias que producen en las observaciones del cielo nocturno.

Ahora, en el que sería el mayor paso internacional para abordar esas inquietudes, los diplomáticos podrían discutir el próximo mes en un foro de las Naciones Unidas si la humanidad tiene derecho a



LANZAMIENTO de 60 satélites Starlink el 11 de marzo de este año.

GETTY IMAGES/BRANDON MOSER/ISTOCK

«cielos oscuros y tranquilos». El debate quizá comience a establecer un marco para que los científicos y el público afronten la avalancha de nuevos satélites.

De hecho, si las empresas y los Gobiernos construyen y lanzan todas las redes o «megaconstelaciones» que han anunciado públicamente, en los próximos años podrían incorporarse a la órbita terrestre decenas de miles de satélites para proporcionar Internet de banda ancha. Como consecuencia, cientos de esos grandes conjuntos de satélites podrían ser visibles durante toda la noche, lo que alteraría el cielo nocturno de una manera jamás vista en la historia de la humanidad. «Esas constelaciones están cambiando radicalmente la forma en que usamos el espacio», afirma Piero Benvenuti, astrónomo de la Universidad de Padua y exsecretario general de la Unión Astronómica Internacional (UAI).

Él y otros astrónomos están trabajando a través de la UAI para aumentar la conciencia internacional sobre el modo en que las megaconstelaciones afectan a los científicos y a la población general. Sostienen que su objetivo no es enfrentar a los astrónomos con las empresas de satélites, sino desarrollar una visión sobre cómo usar de forma justa ese dominio compartido que es el espacio exterior.

«El consenso debe provenir de todos los países», apunta Connie Walker, astrónoma de NOIRLab, una organización que agrupa a varios observatorios financiados por Estados Unidos. Los científicos trataron estos y otros temas en la conferencia sobre constelaciones de satélites SATCON2, que se celebró virtualmente del 12 al 16 de julio.

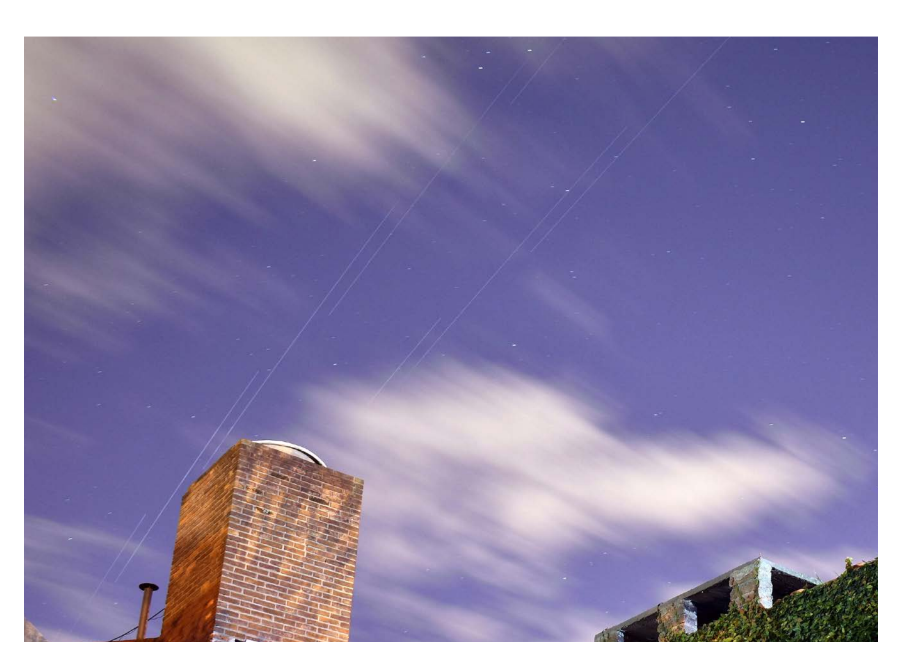
Abierto a la exploración

En 2019, cuando la compañía californiana SpaceX lanzó su primera tanda de satélites Starlink, a muchos astrónomos les sorprendió lo brillantes que esos instrumentos aparecían en las imágenes astronómicas. En respuesta a las quejas, SpaceX probó varios métodos para oscurecerlos; ahora, todos llevan un parasol para hacerlos menos visibles cuando la luz del Sol se refleja en ellos.

Los astrónomos y los representantes de varias empresas, incluida SpaceX, han establecido un umbral de luminosidad para los satélites un poco más tenue de lo que alcanza a ver el ojo humano en un cielo oscuro. Los satélites Starlink se acercan a ese umbral, pero actualmente lo rebasan, señala Meredith Rawls, astrónoma de la Universidad de Washington en Seattle.

Pero dicho umbral es una meta, no un requisito. E incluso si las empresas lo cumplen, los satélites serán visibles en los telescopios. Eso perjudicaría sobre todo a aquellos instrumentos que estudian grandes franjas del cielo. Cerca del crepúsculo y el amanecer, los satélites podrían echar a perder hasta el 40 por ciento de las imágenes del Observatorio Vera C. Rubin, un gran telescopio estadounidense que se está construyendo en Chile. Y las transmisiones de algunos satélites también podrían interferir con radiotelescopios como la Red del Kilómetro Cuadrado, un observatorio internacional que operará desde Sudáfrica y Australia.

No existen leyes que regulen el impacto de los satélites en el cielo nocturno. El Tratado sobre el Espacio Ultraterrestre de 1967, que es el documento fundacional sobre las relaciones internacionales en el es-



ESTELAS DE SATÉLITES STARLINK en una imagen tomada sobre la localidad de Gonnet, en La Plata, provincia de Buenos Aires.

pacio, sostiene que el espacio exterior está «abierto para su exploración». Sin embargo, existe un precedente en cuanto a pedir a la ONU que intente alcanzar un consenso internacional sobre cómo gestionar la contaminación visual del cielo. En 2002, a instancias de la UAI, la Comisión sobre la Utilización del Espacio Ultraterrestre con Fines Pacíficos (COPUOS) de las Naciones Unidas debatió brevemente si podría regularse la «publicidad espacial intrusiva», como vallas publicitarias espaciales que fueran visibles desde la Tierra. Una compañía propuso ese tipo de publicidad para los Juegos Olímpicos de 1996, pero la idea no se materializó y la COPUOS no llegó a actuar sobre el asunto.

Relaciones internacionales

En abril, Benvenuti y otros astrónomos lograron que se abordara la cuestión de las constelaciones de satélites durante una reunión de una subcomisión de la COPUOS. Allí, las delegaciones de cinco países se adhirieron a un libro blanco coordinado por la UAI que afirma que las megaconstelaciones constituyen un motivo de preocupación para los astrónomos y otras personas.

«Presentar ese documento nos dio la oportunidad de hablar sobre el tema con todos esos expertos en política espacial procedentes de muchos países», comenta Andy Williams, responsable de relaciones externas del Observatorio Europeo Austral (ESO). «Es una gran manera de concienciar a la gente.» La ONU no tiene poder para regular los lanzamientos, pero podría convocar a las naciones para establecer normas internacionales que inciten a los operadores de satélites a mitigar los efectos de las megaconstelaciones en la astronomía.

Las delegaciones de EE.UU., Canadá y Japón propusieron que la subcomisión siguiera debatiendo el problema de las constelaciones de satélites como un punto ordinario de sus reuniones. Pero las delegaciones de China y Rusia se opusieron, alegando que necesitaban más tiempo para estudiar la cuestión. China, al igual que otros países, tiene planes para establecer una megaconstelación de satélites que provea Internet de banda ancha en todo el planeta.

Ahora, Benvenuti y otros astrónomos están intentando que toda la COPUOS trate el tema en su próxima reunión, que comienza el 25 de agosto. Este tipo de «presión popular» por parte de los astrónomos es la principal vía para que los países empiecen a discutir el asunto. «El debate tendrá que desarrollarse en los foros internacionales», afirma Tanja Masson-Zwaan, investigadora en derecho espacial de la Universidad de Leiden.

Mientras tanto, los astrónomos trabajan en otras soluciones al problema de las interferencias causadas por las constelaciones de satélites. Una de ellas consiste en desarrollar bases de datos sobre las posiciones de los satélites para predecir cuándo pasarán por un determinado lugar, de manera que los telescopios puedan evitar temporalmente esa parte del cielo, así como programas informáticos para eliminar las estelas de los satélites de las imágenes.

Otros tratan de incorporar más voces al debate sobre las megaconstelaciones, a fin de que no esté dominado por los astrónomos occidentales. Muchas comunidades indígenas tienen profundas raíces culturales que guardan relación con las estrellas, subraya Aparna Venkatesan, astrónoma de la Universidad de San Francisco que lidera los intentos para que esas voces sean escuchadas. La irrupción de las estelas de satélites amenaza esa identidad cultural.

Pero el tiempo apremia, y SpaceX sigue lanzando nuevos conjuntos de satélites: unos 60 por tanda, en ocasiones varias veces al mes. «La gente se pasa años entablando relaciones, pero mientras tanto los satélites no dejan de despegar», lamenta Venkatesan. «Es casi como si estuviéramos encontrando soluciones para un problema de hace tres años.»

Alexandra Witze *es periodista científica especializada en ciencias de la Tierra y ciencias del espacio.*

Artículo original publicado en *Nature News* 16 de julio de 2021.
Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2021

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Impact of satellite constellations on astronomical observations with ESO telescopes in the visible and infrared domains. Olivier R. Hainaut y Andrew P. Williams en *Astronomy & Astrophysics*, vol. 636, art. A121, abril de 2020.

The low Earth orbit satellite population and impacts of the SpaceX Starlink constellation. Jonathan C. McDowell en *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 892, art. L36, abril de 2020.

The impact of satellite constellations on space as an ancestral global commons. Aparna Venkatesan et al. en *Nature Astronomy*, vol. 4, págs.1043-1048, noviembre de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Preservar el cielo nocturno. Ronald Drimmel en *IyC*, septiembre de 2020.

Contaminación espacial. Martin N. Ross y Leonard David en *IyC*, abril de 2021.

BOTÁNICA

Las semillas antiguas revelan secretos de la evolución de las plantas con flores

El origen y la rápida diversificación del principal grupo de plantas, cuyas semillas presentan una cubierta protectora, está muy cerca de resolverse

DOUGLAS E. SOLTIS



PIXABAY/NICKYPE

FLORES DE BREZO: Uno de los enigmas clave sobre el origen de las plantas con flores es como surgió una de las cubiertas de sus semillas.

Uno de los acontecimientos decisivos en la evolución de la vida fue la aparición de las plantas con flores, denominadas angiospermas. Hace poco, Gongle Shi, de la Academia de Ciencias China, y sus colaboradores han descrito en *Nature* unos hallazgos fósiles que han arrojado luz al eterno misterio sobre la evolución de sus semillas.

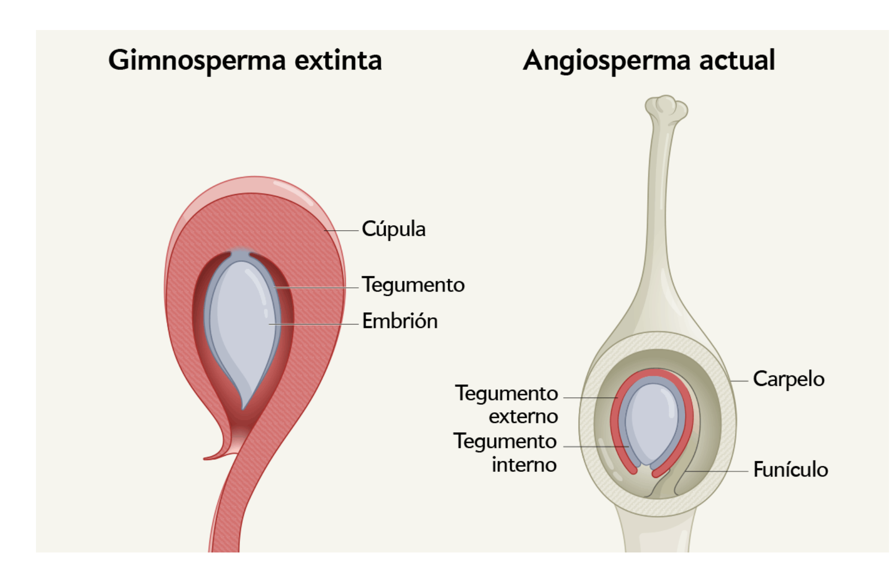
El surgimiento de las plantas con flores estuvo acompañado de una serie de innovaciones botánicas que contribuyeron a su rápido auge hasta dominar los ecosistemas terrestres de todo el mundo y muchos de los acuáticos. Dichas innovaciones atañen a los órganos florales y al endospermo, un tejido especial que nutre al embrión de la planta. Además, las angiospermas y otro grupo de plantas, las gimnospermas, producen semillas, las cuales ofrecen una cubierta protectora al embrión en desarrollo. Esto permitió a las plantas con semillas conquistar el medio terrestre y aventajar a otras plantas terrestres no productoras de semillas, como los musgos y los helechos. Las semillas también han desempeñado un papel decisivo en la supervivencia de la especie humana al proveerla de una importante fuente de alimento.

Las plantas con flores evolucionaron a partir de un ancestro de las gimnospermas, grupo de plantas cuyas semillas están desnudas (sin las flores clásicas), y entre las que figuran las coníferas, los ginkgos (*Ginkgo biloba*) o las cicadáceas. El registro fósil abarca muchos clados de gimnospermas hoy extintas y se desconoce cuál es el grupo del que proceden las angiospermas, si bien no cabe duda de que no se trata de ninguna de las gimnospermas actuales.

Las semillas de todas las gimnospermas están envueltas en una única capa protectora, llamada tegumento, mientras que las de las angiospermas poseen dos. En una carta dirigida al botánico J. D. Hooker, Charles Darwin describió el origen de las plantas con flores como un «misterio abominable». Uno de los enigmas clave es cómo evolucionó esa segunda capa protectora (externa). El tegumento externo difiere del interno en su vía de desarrollo y en el control genético que dirige la formación del tejido, por lo que ambas capas son claramente distintas.

De uno a dos tegumentos

Shi y sus colaboradores han descrito fósiles muy bien conservados de plantas con semillas hoy extintas. Al combinar estos asombrosos restos con otros similares hallados con anterioridad, los autores han trazado las relaciones filogenéticas entre las plantas. Su trabajo coloca todos estos fósiles en una posición próxima a las angiospermas, en el linaje de las plantas. Están estrechamente emparentados con las plantas con flores actuales y, como tales,



ORIGEN DE LAS PLANTAS CON FLORES: También conocidas como angiospermas, este grupo de plantas surgieron de otras hoy extintas pertenecientes al grupo de las gimnospermas (entre cuyos miembros actuales figuran las coníferas). Las gimnospermas actuales poseen un tegumento que envuelve al embrión de la semilla. En las gimnospermas extintas, las semillas presentaban una capa externa llamada cúpula que habría conferido protección o contribuido a la dispersión (*izquierda*). Las semillas de las angiospermas poseen un tegumento interno y otro externo (*derecha*). Ahora se ha demostrado que el tegumento externo de las angiospermas probablemente derive de la cúpula. Sus semillas están unidas al carpelo que las rodea mediante una estructura filiforme llamada funículo, que habría evolucionado a partir del filamento de la cúpula de las gimnospermas antiguas.

ofrecen pistas sobre su origen. Destaca la extraordinaria diversidad en la forma de sus estructuras reproductoras.

De manera sorprendente, el hallazgo de estos fósiles no es reciente, sino que vieron la luz hace casi un siglo y fueron depositados en colecciones museísticas, de las que los autores los volvieron a desenterrar hace poco por segunda vez (en esta ocasión, de los cajones de los museos) para recibir por fin el reconocimiento de su relevancia en la reconstrucción del árbol genealógico de las plantas.

Además del tegumento único propio de todas las gimnospermas (tanto actuales como antiguas), las semillas de estas plantas extintas estaban envueltas en una estructura denominada cúpula. Se desconoce su papel, pero es posible que confiriera una protección adicional a la semilla o contribuyera a su dispersión.

¿Puede ser la cúpula la precursora de la capa protectora externa que caracteriza a las semillas de las angiospermas? Nos falta otro giro (juego de palabras intencionado) para resolver el misterio de las semillas de las plantas con flores. Estas son singulares también por su estructura general: la parte superior de la semilla está girada hacia el filamento que la une al cuerpo de la planta. Imaginemos que, en lugar de permanecer de pie con la cabeza y los pies en cada extremo (en una posición análoga al «plano corporal» de la semilla de una gimnosperma actual), nos encorváramos para acercar la cabeza a los dedos de los pies (a imitación de la semilla de una angiosperma). Lo determinante es que las cúpulas de estos fósiles recién descritos, y las semillas a las que envuelven, también están curvadas de una manera que recuerda de forma extraordinaria a las inconfundibles semillas «retorcidas» de las plantas con flores.

El equipo de Shi describe fósiles que datan de hace solo unos 126 millones de años, una fecha en la que, según la mayoría de las estimaciones, las angiospermas ya habían irrumpido en escena. ¿Cuál es la revelación entonces? Los fósiles similares con cúpulas son mucho más antiguos, como es el caso de *Caytonia*, una gimnosperma extinta cuyo hallazgo hizo pensar primero que las plantas antiguas parecidas con cúpulas y semillas estaban emparentadas de forma estrecha con las plantas con flores o eran incluso sus ancestros. Pero estas se remontan a hace unos 250 millones de años, mucho antes de lo que la mayoría de los cálculos señala como el momento en que surgieron las angiospermas. En su conjunto, los fósiles recién detallados, junto con los ejemplares con cúpulas anteriormente descubiertos, trazan una imagen clara que demuestra que el segundo tegumento deriva de la cúpula de una gimnosperma extinta. Misterio resuelto.

Aunque el trabajo de Shi y sus colaboradores parece haber resuelto el enigma del tegumento externo de las semillas de las angiospermas, otros misterios siguen sin respuesta. Entre ellos, cuál es el origen del órgano protector (el ovario) que encierra todas las semillas en la flor y que acaba convirtiéndose en el fruto, otro componente vital para la supervivencia del ser humano que transformó nuestro planeta. En las angiospermas, el origen de las estructuras especiales portadoras del polen, denominadas estambres, también sigue sin esclarecerse. Otro interrogante de la evolución incumbe al endospermo, un tejido exclusivo de las plantas con flores.

Por largo tiempo ha prevalecido la visión romántica de que los fósiles que pueden resolver este y otros misterios deben provenir del trabajo sobre el terreno de paleontólogos armados de martillos geológicos. Pero, como demuestran Shi y sus colaboradores, tal vez otras piezas decisivas del rompecabezas del registro fósil no precisan ser desenterradas. Quizás permanezcan ocultas a simple vista en colecciones paleobotánicas de todo el mundo, a la espera de que un intrépido científico sencillamente abra el cajón correcto de la vitrina adecuada.

Douglas E. Soltis *es profesor del Museo de Historia Natural de Florida y del Departamento de Biología de la Universidad de Florida, en Gainesville.*

Artículo original publicado en *Nature* vol. 594, págs. 185-186, 2021
Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2021

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Mesozoic cupules and the origin of the angiosperm second integument. Gongle Shi et al. en *Nature*, vol. 594, págs. 223-226, mayo de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

La compleja vida de las plantas. VV.AA., colección *Temas* de *IyC* n.º 101, 2020.

INTRODUCCIÓN

EN BUSCA DE LOS CONSTITUYENTES BÁSICOS DEL UNIVERSO

Los resultados negativos pueden servir también como acicate para la ciencia. Tras el hallazgo del bosón del Higgs en 2012, no pocos físicos tenían la esperanza de que, poco después, el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN descubriría la primera partícula elemental no predicha por el modelo estándar. Desde hacía décadas, toda una serie de argumentos teóricos y un sinfín de modelos fenomenológicos venían sugiriendo que era poco probable que el bosón de Higgs apareciese solo. Entre otras razones, el enigma de la materia oscura y la enrevesada estructura del modelo estándar parecían indicar que, a una escala de energías no muy superior a la masa del bosón de Higgs, tendrían que comenzar a aparecer nuevos constituyentes fundamentales de la naturaleza.

No obstante, casi diez años después del célebre hallazgo, el LHC ha explorado ya buena parte del intervalo de energías para el que fue diseñado y sigue sin encontrar nada. Los físicos cuentan con sobradas razones para pensar que el modelo estándar no puede ser la teoría final: antes o después, a alguna escala de energías, tendrían que comenzar a aparecer nuevas partículas. Por ello, la posibilidad de que dichas partículas puedan quedar fuera del alcance del LHC, donde muchos esperaban encontrarlas, ha contribuido a impulsar nuevas líneas de investigación, tanto teóricas como experimentales.

El presente informe ilustra el camino que han tomado algunos de esos enfoques. A partir de una pregunta tan aparentemente sencilla como profunda, el artículo «¿Qué es una partícula elemental?» (*pág. 22*) hace un magnífico recorrido conceptual e histórico por la idea de partícula y describe dos programas de investigación que, en los últimos años, han comenzado a cambiar la manera de pensar en los constituyentes fundamentales de la naturaleza. El informe incluye también una novedosa representación gráfica del modelo estándar, la teoría que condensa todo el conocimiento actual sobre el mundo subatómico (*pág. 30*). La construcción paso a paso de la infografía no solo ilumina la estructura de esta teoría, sino que enfatiza un aspecto clave que, sin embargo, suele omitirse en casi todas las presentaciones divulgativas: la estructura «quiral» del modelo estándar, o la asimetría —calificada en cierta ocasión como «perversa» por un reputado investigador— con que la teoría trata a las partículas levógiras y dextrógiras.

Por supuesto, no toda la investigación en física fundamental es teórica. En los últimos años, la necesidad de seguir explorando la frontera energética ha abierto el debate sobre qué proyectos experimentales deberían suceder al LHC. Ante los descomunales costes que supondría construir un colisionador más potente basado en la tecnología actual, cada vez más investigadores se están volcando en explorar métodos totalmente nuevos para acelerar partículas. Uno de ellos, la aceleración basada en plasma, podría ofrecer una vía para alcanzar las energías requeridas con máquinas mucho más pequeñas y económicas que las actuales (*pág. 36*). El futuro dirá qué camino toma la física de partículas; una disciplina que, como muestran estas páginas, sigue viva y evolucionando.

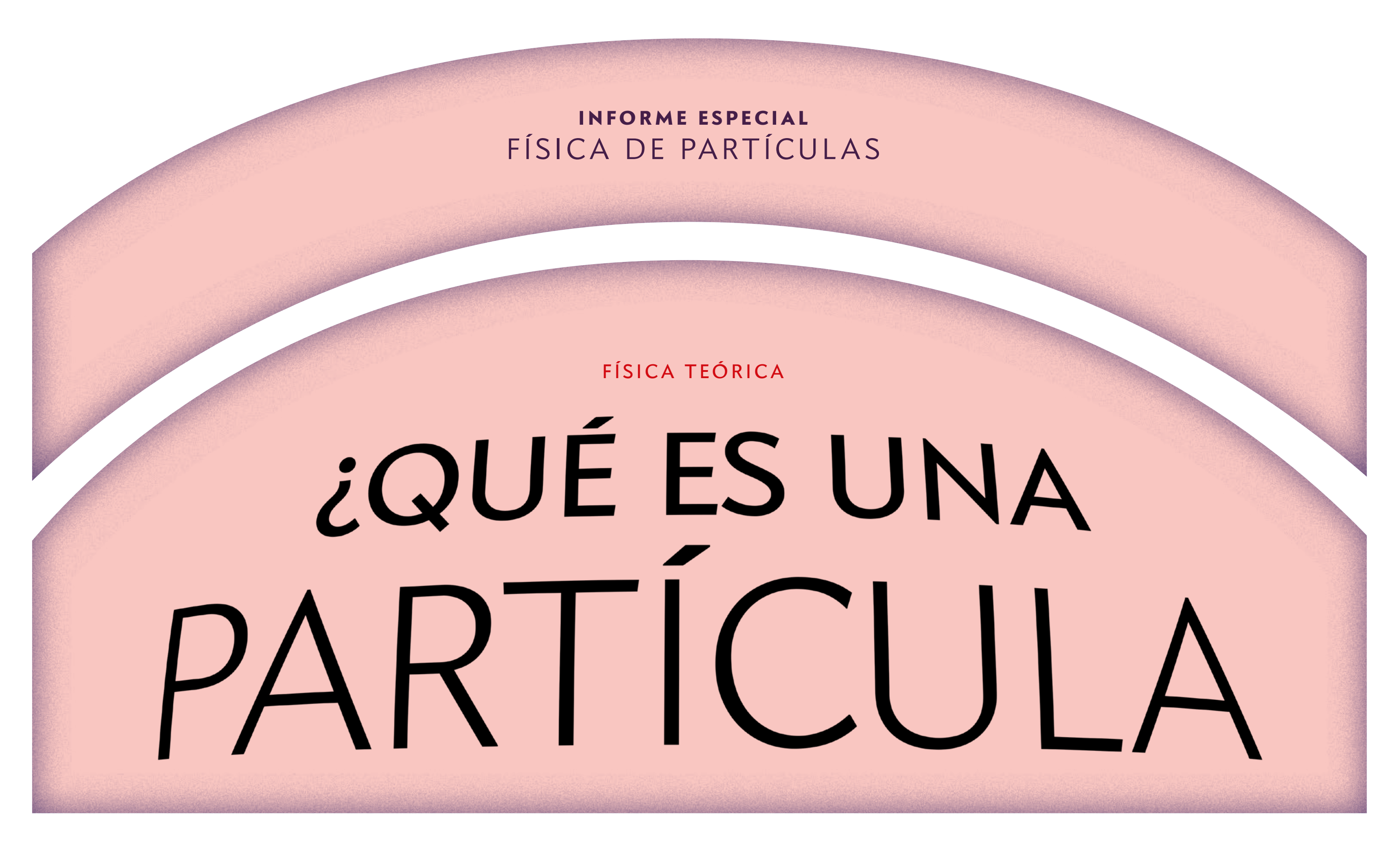
—La redacción



SUMARIO



LAS PARTÍCULAS ELEMENTALES
son los bloques básicos del universo.
También son profundamente extrañas.



INFORME ESPECIAL
FÍSICA DE PARTÍCULAS

FÍSICA TEÓRICA

¿QUÉ ES UNA PARTÍCULA ELEMENTAL?

Se ha pensado en ellas de muchas maneras: como objetos puntuales, excitaciones de un campo o matemáticas puras que han irrumpido en la realidad. Ahora, dos nuevos enfoques están redefiniendo la idea de partícula elemental

Natalie Wolchover

Ilustraciones de Ashley Mackenzie

Natalie Wolchover es redactora y editora de *Quanta Magazine*.



D ADO QUE TODO EN EL UNIVERSO SE REDUCE A PARTÍCULAS ELEMENTALES, LA PREgunta resulta natural: ¿qué son? Una respuesta fácil enseguida se revelará insatisfactoria. Se supone que los electrones, los fotones, los quarks y las demás partículas «fundamentales» carecen de estructura interna o extensión física. Según Mary K. Gaillard, física de partículas de la Universidad de California en Berkeley que en los años setenta predijo la masa de dos tipos de quarks, «básicamente pensamos en una partícula como en un objeto puntual». Sin embargo, las partículas difieren en rasgos como la carga o la masa. ¿Cómo es posible que un punto sin dimensiones «pese»?

«Decimos que son fundamentales», afirma Xiao-Gang Wen, físico teórico del Instituto de Tecnología de Massachusetts, «pero esto no es más que una manera de decirles a los estudiantes: "¡No preguntes! No sé la respuesta. Es fundamental y listo, no preguntes más".».

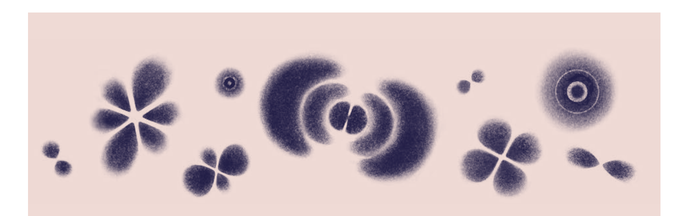
Si se tratase de cualquier otro objeto, sus propiedades dependerían de su estructura física y, en último término, de las partículas que lo componen. Pero las propiedades de las partículas elementales no se derivan de otros constituyentes, sino de su estructura matemática. En tanto que conforman el punto de contacto entre las matemáticas y la realidad, las partículas se encuentran a caballo entre ambos mundos, en una especie de equilibrio incierto.

Al preguntar a varios físicos de partículas qué es una partícula, las respuestas han resultado ser sorprendentemente variadas. Todos ellos hacen hincapié en que los distintos puntos de vista no son excluyentes, sino que capturan distintas facetas de la verdad. También han descrito dos nuevas líneas de investigación que están intentando proporcionar una imagen más amplia y satisfactoria de las partículas.

«¿Qué es una partícula? No cabe duda de que es una pregunta muy interesante», afirma Wen. «Estamos haciendo progresos para poder responderla. No diré que existe un punto de vista único, pero hay diferentes visiones y todas ellas parecen interesantes.»

UNA FUNCIÓN DE ONDA COLAPSADA

El intento de entender los constituyentes fundamentales de la naturaleza se remonta a la antigua Grecia y a la afirmación de Demócrito de que tales objetos existen. Dos milenios después, Isaac Newton y Christiaan Huygens discutieron si la luz estaba compuesta por partículas o por ondas. Unos 250 años después, la mecánica cuántica demostró que ambos sabios estaban en lo cierto: la luz consta de pequeños paquetes de energía llamados fotones, los cuales pueden comportarse como ondas o como partículas.



«En el momento de la detección, la onda colapsa y se convierte en una partícula. La partícula es la función de onda colapsada»

—Dimitri Nanopoulos

EN SÍNTESIS

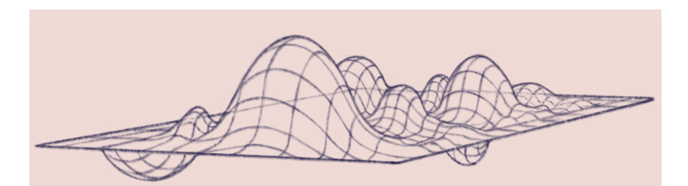
La idea de partícula elemental puede abordarse desde ángulos sorprendentemente dispares. Estos incluyen desde su definición en términos de excitaciones de un campo hasta un enfoque puramente matemático basado en grupos de simetría.

En los últimos años, dos líneas de investigación han comenzado a cambiar la manera de pensar en los constituyentes básicos del universo. Una de ellas parte de una imagen de la naturaleza basada puramente en qubits e información cuántica.

Otra se basa en lo único que realmente pueden medir los experimentos: la probabilidad de que las partículas interaccionen de una forma u otra. Tales probabilidades parecen poseer una estructura subyacente que los físicos intentan desentrañar.

La dualidad onda-partícula resultó ser el síntoma de una profunda rareza. En los años veinte del siglo pasado, la mecánica cuántica reveló que la mejor descripción de los fotones y otros objetos cuánticos es en términos de abstractas «funciones de onda»: entidades matemáticas dependientes del tiempo que codifican la probabilidad de que la partícula muestre unas propiedades u otras. Por ejemplo, la función de onda de un electrón puede estar esparcida por el espacio, con lo que este tendrá asociadas varias localizaciones posibles. Pero lo extraño es que, cuando usamos un detector y medimos su posición, la función de onda súbitamente «colapsará» en un solo punto y el aparato registrará la partícula en ese lugar.

Una partícula es, por tanto, una función de onda colapsada. Pero ¿qué significa eso? ¿Por qué la observación causa que una función extendida colapse y aparezca una partícula concreta? ¿Qué decide el resultado de la medida? Casi un siglo después, los físicos siguen sin tener la menor idea.



«La física de partículas se escribe en un lenguaje matemático llamado teoría cuántica de campos. Según esta, hay multitud de campos, cada uno con sus propiedades y sus excitaciones. Los campos se distinguen por esas propiedades, y sus excitaciones son lo que llamamos partículas»

—Helen Quinn

LA EXCITACIÓN DE UN CAMPO CUÁNTICO

Poco después la imagen se hizo aún más extraña. En los años treinta, los físicos se percataron de que la función de onda de un gran número de fotones se comporta colectivamente como una sola onda que se propaga como una combinación de campos eléctricos y magnéticos. Esta no es otra que la imagen de la luz descubierta en el siglo XIX por James Clerk Maxwell. Pero los investigadores descubrieron que era posible «cuantizar» una teoría de campos clásica imponiendo que los campos solo pudieran oscilar en cantidades discretas, conocidas como cuantos del campo. Además de los fotones (los cuantos de luz), Paul Dirac y otros físicos hallaron que la idea podía extenderse a los electrones y a todo lo demás. Según la teoría cuántica de campos, las partículas son las excitaciones de los campos cuánticos que llenan el espacio.

Al afirmar la existencia de tales campos, más fundamentales, la teoría cuántica de campos rebajó el estatus de las partículas, las cuales pasaron a ser meros fragmentos de energía que agitaban los campos cuánticos. Pero, a pesar de ese bagaje ontológico de campos omnipresentes, la teoría cuántica de campos acabaría convertida en el lenguaje de la física de partículas, ya que permitía predecir con una precisión extrema el comportamiento de las partículas cuando interaccionan entre sí. Tales interacciones son, precisamente, las que construyen el mundo a un nivel básico.

A medida que se fueron descubriendo más partículas y sus campos asociados, comenzó a desarrollarse una perspectiva paralela. Las propiedades de las partículas y los campos parecían seguir pautas numéricas. Y, al extenderlas, los físicos lograron predecir la existencia de nuevas partículas. «Una vez que codificamos matemáticamente las pautas observadas, esas matemáticas se tornan predictivas», explica Helen Quinn, física de partículas e investigadora emérita de Stanford. Al mismo tiempo, esos patrones matemáticos ofrecieron una perspectiva más abstracta y potencialmente más profunda de la verdadera naturaleza de las partículas.

UNA REPRESENTACIÓN DE UN GRUPO

Mark Van Raamsdonk recuerda el comienzo de su primera clase de teoría cuántica de campos como estudiante de doctorado en la Universidad de Princeton. El profesor entró, miró a los estudiantes y preguntó: «¿Qué es una partícula?». «Una representación irreducible del grupo de Poincaré», respondió un adelantado compañero de clase. Dando por sentado que esa definición, aparentemente correcta, era conocida por el resto de los estudiantes, el profesor prescindió de explicaciones adicionales y comenzó a impartir una inescrutable serie de clases. «En todo el semestre no aprendí nada en ese curso», afirma Van Raamsdonk, hoy un respetado físico teórico en la Universidad de la Columbia Británica.

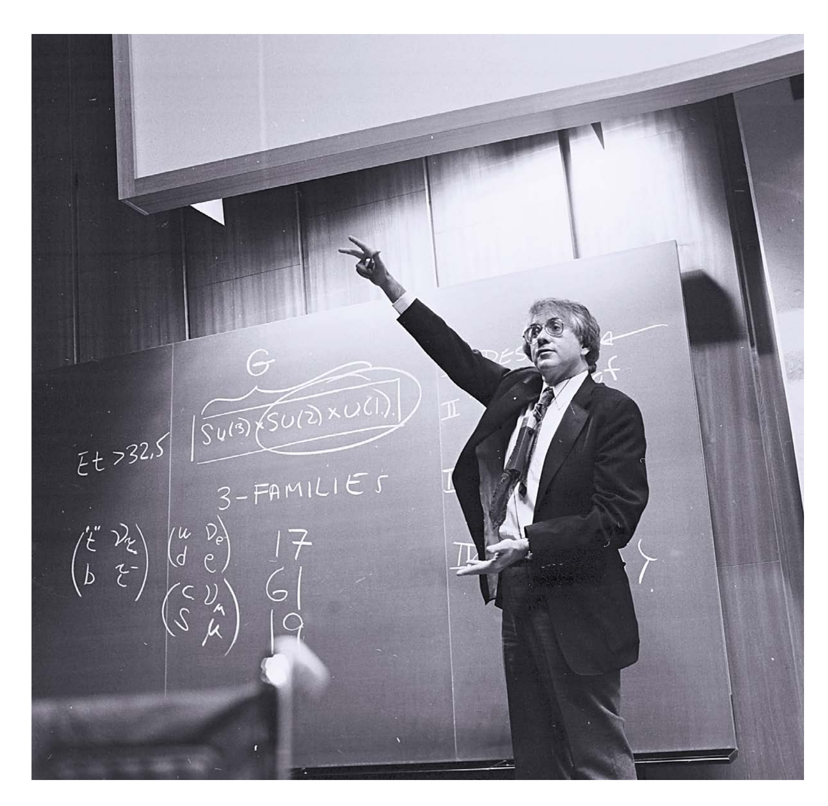
La profunda respuesta de aquel estudiante constituye un estándar entre los expertos: las partículas son «representaciones» de grupos de simetrías, que, a su vez, son conjuntos de transformaciones que pueden aplicarse a los objetos. Consideremos un triángulo equilátero. Si lo rotamos 120 grados, 240 grados, lo reflejamos con respecto a la línea que une cada vértice con el punto central del lado opuesto o, simplemente, no hacemos nada, el triángulo resultante será idéntico al de partida. Estas seis simetrías forman un grupo. Dicho grupo puede expresarse como un conjunto de matrices: tablas de números que, al multiplicarlos por las coordenadas de un triángulo equilátero, nos devuelven las mismas coordenadas. El conjunto formado por esas matrices constituye una «representación» del grupo de simetría.

De manera similar, los electrones, los fotones y las demás partículas elementales son objetos que permanecen esencialmente iguales cuando sobre ellos actúa un cierto grupo. En concreto, las partículas son representaciones del llamado grupo de Poincaré: el grupo que dicta las diez maneras posibles de moverse en el continuo espaciotemporal. Un objeto puede trasladarse en las tres direcciones espaciales y en el tiempo; puede también rotar en las tres direcciones del espacio, y moverse con velocidad constante a lo largo de ellas. En 1939, el físico matemático Eugene Wigner identificó las partículas como los objetos más simples que pueden trasladarse, rotar o moverse.



«Lo mínimo que podemos decir es que las partículas quedan descritas por las representaciones irreducibles del grupo de Poincaré»

—Sheldon L. Glashow



SHELDON L. GLASHOW en el CERN en 1979, dos semanas después de recibir el premio Nobel de física por sus contribuciones a la formulación de la teoría electrodébil.

Lo que Wigner realmente supo ver fue que, para que un objeto pudiera cambiar de la manera correcta bajo esas diez transformaciones del grupo de Poincaré, ha de tener un conjunto mínimo de propiedades. Esas son las propiedades que definen a las partículas. Una de ellas es la energía: en el fondo, esta no es más que la cantidad que se mantiene constante cuando el objeto se desplaza en el tiempo. De forma similar, el momento lineal es la propiedad que se conserva cuando el objeto se mueve en el espacio.

Hay una tercera propiedad que es necesario especificar para saber cómo se transforman las partículas cuando las rotaciones espaciales se combinan con movimientos en el espacio tridimensional (ambos tipos de transformaciones dan lugar a rotaciones en el espaciotiempo). Dicha propiedad es el espín. Cuando Wigner llevó a cabo su trabajo, los físicos ya sabían que las partículas tienen espín, una especie de momento angular intrínseco que determina numerosos aspectos del comportamiento de la partícula, incluido si actúa como materia (como los electrones, por ejemplo) o como fuerza (los fotones). Wigner demostró que, en el fondo, «el espín no es más que una etiqueta que tienen las partículas debido a que en el mundo existen las rotaciones», explica Nima Arkani-Hamed, físico teórico de partículas del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton.

Las diferentes representaciones del grupo de Poincaré corresponden a partículas con un número distinto de «etiquetas de espín», o grados de libertad que se ven afectados por las rotaciones. Por ejemplo, hay partículas que tienen tres grados de libertad de espín, las cuales rotan de la misma manera que los objetos tridimensionales con los que estamos familiarizados. Por su parte, todas las partículas de materia poseen dos grados de libertad de espín, a los que podemos llamar «espín hacia arriba» y «espín hacia abajo». Estas partículas rotan de manera diferente. Cuando giramos un electrón 360 grados, su estado de espín se invierte. Como analogía visual, podemos pensar en lo que le ocurre a una flecha que se desplaza a lo largo de una banda de Möbius: tras una vuelta, la flecha acabará apuntando en sentido contrario al de partida. En la naturaleza hay también partículas elementales con una y con cinco etiquetas de espín. Por ahora, lo único que parece faltar es una representación del grupo de Poincaré con cuatro etiquetas de espín.

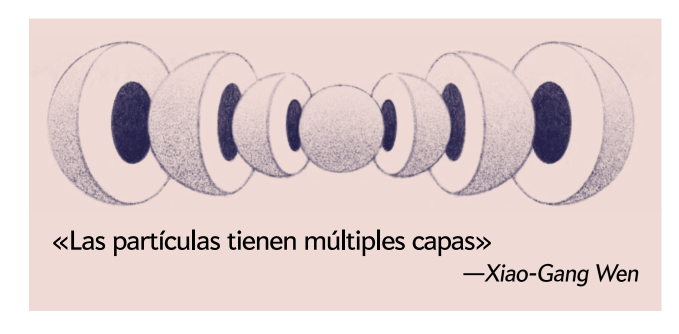
La correspondencia entre partículas elementales y representaciones resulta tan directa que algunos físicos, como el profesor de Van Raamsdonk, las identifican. Otros ven en ello una mezcla de conceptos. «La representación no es la partícula; es una manera de describir ciertas propiedades de la partícula», señala Sheldon L. Glashow, receptor del premio Nobel de física en 1979 y profesor emérito de Harvard y la Universidad de Boston. «No confundamos ambas cosas», advierte.

OBJETOS CON VARIAS CAPAS

Haya o no distinción, la relación entre la física de partículas y la teoría de grupos fue enriqueciéndose a lo largo del siglo xx. Varios hallazgos mostraron que las partículas elementales no solo tienen el conjunto mínimo de etiquetas que hacen falta para navegar por el espaciotiempo. Poseen también etiquetas adicionales y un tanto superfluas.

Dos partículas con la misma energía, momento y espín se comportarán de idéntico modo bajo las diez transformaciones del grupo de Poincaré. Sin embargo, pueden diferir en otros aspectos, como la carga eléctrica. Cuando, a mediados del siglo xx, se descubrió lo que Quinn llama «el zoo de partículas», se observaron varias diferencias entre ellas que obligaron a introducir nuevas etiquetas. Estas se conocen con los apodos de «color» y «sabor». Al igual que las partículas son representaciones del grupo de Poincaré, los teóricos han llegado a la conclusión de que estas propiedades adicionales reflejan nuevas maneras en que las partículas pueden transformarse. Pero, en lugar de corresponder a movimientos en el espaciotiempo, tales transformaciones resultan ser más abstractas. Por decirlo de alguna forma, lo que hacen es cambiar los «estados internos» de las partículas.

Consideremos la propiedad denominada color. En los años sesenta, los físicos concluyeron que los quarks, los constituyentes elementales del núcleo atómico, existían en una combinación probabilística de tres posibles estados que apodaron «rojo»,



CERN



«Lo que conocemos como partículas elementales podrían ser cuerdas en vibración»
—Mary K. Gaillard

«verde» y «azul». Estos calificativos no guardan ninguna relación con colores reales ni con cualquier otra propiedad perceptible. Lo único que importa es el número de etiquetas: los quarks, que tienen tres, son representaciones de un grupo de transformaciones llamado $SU(3)$, que consiste en los infinitos modos de mezclar matemáticamente esas tres etiquetas.

Mientras que las partículas con color constituyen representaciones del grupo de simetría $SU(3)$, las partículas con las propiedades internas de sabor y carga eléctrica son representaciones de los grupos de simetría $SU(2)$ y $U(1)$. Por eso suele decirse que el modelo estándar de la física de partículas, la teoría cuántica de campos que describe todas las partículas elementales conocidas y sus interacciones, corresponde al grupo de simetría $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$, que consiste en todas las posibles combinaciones de las operaciones de simetría en los tres subgrupos (que las partículas también se transforman bajo el grupo de Poincaré resulta probablemente tan obvio que, a estas alturas, no parece que nadie sienta la necesidad de mencionarlo).

Medio siglo después de su formulación, el modelo estándar sigue vigente. Aun así, se trata de una descripción incompleta del universo. No incluye la gravedad, una interacción que la teoría cuántica de campos no consigue tratar por completo, y que la teoría de la relatividad general de Einstein describe de manera independiente como un efecto de la curvatura del espaciotiempo. Y más allá, la estructura tripartita $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ del modelo estándar suscita preguntas. Dimitri Nanopoulos, veterano físico de partículas de la Universidad de Texas A&M, lo expresa así: «¿De dónde diablos viene todo esto? Bien, supongamos que funciona. Pero ¿qué es esto? No puede haber tres grupos. Lo que quiero decir es que "Dios", entre comillas, puede hacerlo bastante mejor».

CUERDAS EN VIBRACIÓN

En los años setenta, Glashow, Nanopoulos y otros investigadores intentaron encajar el grupo $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ en un grupo de transformaciones mayor. La idea era que, en el origen del universo, todas las partículas habrían sido representaciones de un solo grupo de simetría, y que las cosas comenzaron a complicarse cuando esa simetría primigenia se rompió. El candidato más natural para formular esa «teoría de gran unificación» fue el grupo $SU(5)$, pero pronto los experimentos descartaron dicha opción. Con todo, otras posibilidades menos atractivas permanecen abiertas.

Los investigadores depositan mayores esperanzas en la teoría de cuerdas. Esta parte de la idea de que, si ampliásemos una partícula lo suficiente, lo que veríamos no sería un objeto puntual, sino un pequeño filamento que vibra. También descubriríamos que el espacio tiene seis dimensiones más, que según la teoría de cuerdas estarían enrolladas sobre sí mismas en cada punto de nuestro conocido espaciotiempo tetradimensional. A su vez, la geometría que adoptan esas seis dimensiones determina las propiedades de las cuerdas y, con ellas, las del mundo macroscópico. Y las simetrías «internas» de las partículas, como las operaciones de $SU(3)$ que transforman el color de los quarks, adquieren así un significado físico: corresponden a rotaciones en esas diminutas dimensiones espaciales, de manera similar a como el espín refleja las rotaciones en las dimensiones macroscópicas. Según Nanopoulos, «la geometría nos da la simetría y esta, a su vez, nos da las partículas; todo va unido».

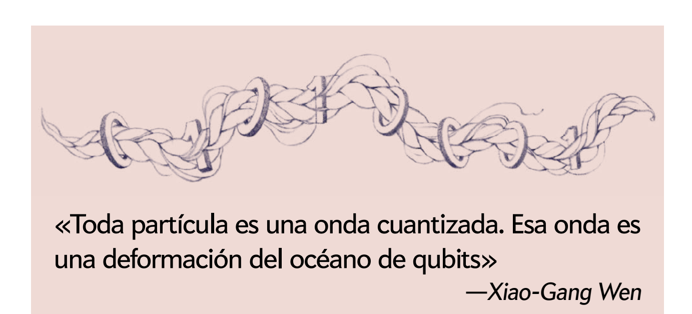
No obstante, si las cuerdas o las dimensiones adicionales existen, serían demasiado pequeñas para poder detectarlas en los experimentos, por lo que, en ausencia de estos, han surgido otras ideas. A lo largo de la última década, dos estrategias han atraído a las mentes más brillantes de la física fundamental. Y, una vez más, ambas han revitalizado la imagen de las partículas.

UNA DEFORMACIÓN EN UN OCÉANO DE QUBITS

La primera de estas líneas de investigación sigue el eslogan en inglés *it from qubit*, que expresa la hipótesis de que todo lo que existe en el universo (*it*, «eso», lo que incluye no solo las partículas, sino también el espaciotiempo en el que están insertadas) emerge a partir de bits cuánticos de información, o qubits. Un qubit constituye una combinación probabilística de dos estados, usualmente denotados 0 y 1. Y aunque pueden almacenarse en sistemas físicos, al igual que los bits ordinarios en los transistores, desde un punto de vista más abstracto es posible pensar en ellos como en mera información. Cuando consideramos múltiples qubits, sus posibles estados pueden entrelazarse, de forma que cada uno de ellos depende de todos los demás. Debido a estas particularidades, un número modesto de qubits puede codificar una gran cantidad de información.

Para entender a qué corresponden las partículas en esta imagen del universo, primero hemos de entender el espaciotiempo. En 2010, Van Raamsdonk escribió un influyente artículo en el que puso en negro sobre blanco lo que ya venían señalando varios cálculos y donde argumentaba que los qubits entrelazados podían ser las «costuras» que mantienen unido el tejido espaciotemporal. Durante décadas, diversos cálculos, experimentos mentales y ejemplos sencillos han indicado que el espaciotiempo tiene propiedades «holográficas»: toda la información contenida en una región del espaciotiempo puede codificarse en grados de libertad situados en un espacio con una dimensión menos; un espacio que, con frecuencia, es la frontera de la región considerada [*véase* «El espacio, ¿una ilusión?», por Juan Maldacena; Investigación y Ciencia, enero de 2006]. Según Van Raamsdonk, «en los últimos diez años hemos entendido muchísimo mejor cómo funciona esta codificación».

Lo que resulta más sorprendente y fascinante de la relación holográfica es que el espaciotiempo tiene curvatura porque incluye la gravedad; sin embargo, el espacio de dimensión me-



«Toda partícula es una onda cuantizada. Esa onda es una deformación del océano de qubits»
—Xiao-Gang Wen

nor que codifica la información de una región curva es un sistema puramente cuántico que carece de curvatura, de gravedad o incluso de geometría. Puede entenderse como un sistema de qubits entrelazados. Y según este programa de investigación, las propiedades del espaciotiempo (su robustez y sus simetrías) provienen esencialmente de la manera en que se entrelazan esos ceros y unos. La larga búsqueda de una descripción cuántica de la gravedad se reduciría así al problema de identificar el tipo de entrelazamiento entre qubits que codifica la clase concreta de espaciotiempo que encontramos en el universo.

Por ahora, los físicos han aprendido mucho más sobre cómo funciona esta idea en «universos de juguete» con curvatura negativa, con los que resulta relativamente fácil trabajar. Nuestro mundo, en cambio, tiene curvatura positiva. Pero, para su sorpresa, los investigadores han hallado que, siempre que un espaciotiempo de curvatura negativa admite una descripción holográfica, las partículas acaban apareciendo. Es decir, siempre que un sistema de qubits codifique holográficamente una región del espaciotiempo, habrá patrones de entrelazamiento entre qubits que corresponderán a porciones de energía localizadas flotando en ese mundo con una dimensión más.

Lo importante es que, al traducir las operaciones algebraicas sobre qubits al lenguaje del espaciotiempo, «estas se comportan exactamente como rotaciones que actúan sobre partículas», explica Van Raamsdonk. «Te das cuenta de que existe esa imagen codificada en un sistema cuántico sin gravedad. Y de alguna manera, ese código —siempre que podamos descifrarlo— nos dice que hay partículas en algún otro espacio», añade. El hecho de que el espaciotiempo holográfico contenga siempre esos estados de partículas constituye «una de las características más importantes que distingue estos sistemas holográficos de otros sistemas cuánticos», continua Van Raamsdonk. «Creo que nadie entiende realmente por qué los modelos holográficos muestran esta propiedad.»

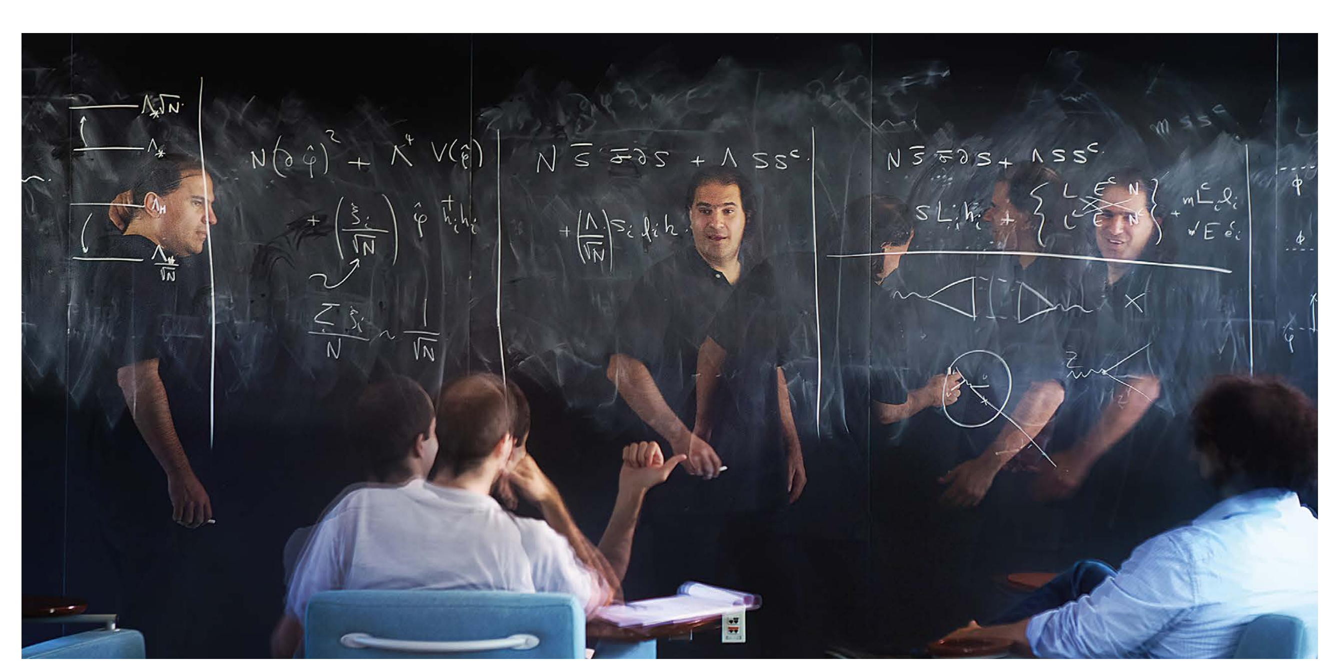
> La línea de investigación basada en qubits y la amplitudología son tan diferentes que resulta difícil saber si se complementan o se contradicen

Resulta tentador imaginar que los qubits tienen algún tipo de ordenación espacial que crea el universo holográfico, del mismo modo que un holograma ordinario se proyecta a partir de configuraciones espaciales. Sin embargo, las relaciones e interdependencias entre los qubits pueden ser mucho más abstractas y no poseer ordenación espacial alguna. «No es necesario hablar de esos ceros y unos como si vivieran en un espacio en particular», indica Netta Engelhardt, física del Instituto de Tecnología de Massachusetts que en 2020 recibió uno de los premios Breakthrough por sus trabajos sobre la información cuántica contenida en un agujero negro [*véase* «La paradoja más famosa de la física se acerca a su fin», por George Musser; Investigación y Ciencia, febrero de 2021]. «Podemos hablar de la existencia abstracta de ceros y unos y de cómo un operador actuaría sobre ellos. Y todo eso no son más que relaciones matemáticas abstractas», explica.

No cabe duda de que aún queda mucho por entender. Pero, si esta imagen de la naturaleza basada en qubits es correcta, entonces las partículas serían hologramas, al igual que el propio espaciotiempo. Su definición más fiel sería en términos de qubits.

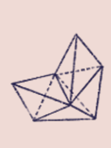
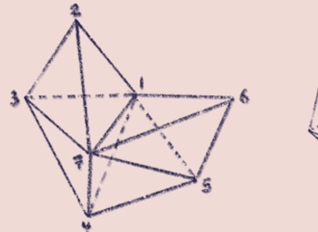
LO QUE MIDEN LOS DETECTORES

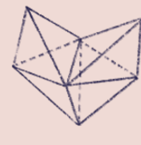
Por último, otro grupo de investigadores, autodenominados «amplitudólogos», intentan devolver el foco de atención a las partículas mismas. Su argumento es que la teoría cuántica de



NIMA ARKANI-HAMED, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, ha investigado la relación entre las interacciones entre partículas elementales y las propiedades de ciertos objetos geométricos abstractos.

BÉATRICE DE GÉA PARA *QUANTA MAGAZINE*



«Las partículas son lo que miden los detectores. Empezamos dejando caer en el lenguaje que lo real son los campos cuánticos y que las partículas son excitaciones. Hablamos de partículas virtuales. Pero nada de eso hace clic en ningún detector»

—Nima Arkani-Hamed

campos, el lenguaje de la física de partículas, cuenta una historia demasiado enrevesada. Los físicos la usan para obtener ciertas fórmulas básicas llamadas amplitudes de dispersión, las cuales se encuentran entre las características de la realidad más básicas que pueden calcularse. Cuando las partículas colisionan, las amplitudes indican la manera en que se transforman y se dispersan. Y dado que el mundo surge de las interacciones entre partículas, los físicos comprueban su descripción de la naturaleza comparando las amplitudes de dispersión que han calculado con los resultados de los experimentos, como los que se llevan a cabo en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN.

Por regla general, calcular esas amplitudes requiere tener en cuenta todas las maneras posibles en que pueden reverberar las ondulaciones de los campos cuánticos antes de convertirse en las partículas estables que emergerán del punto donde se produjo la colisión. Y curiosamente, cientos y cientos de páginas de cálculos suelen acabar simplificándose en una fórmula que cabe en una sola línea. Por ello, los amplitudólogos argumentan que la representación en términos de campos cuánticos está oscureciendo un patrón matemático mucho más simple. Arkani-Hamed, uno de los líderes de este programa de investigación, se refiere a los campos como «una ficción conveniente». «En física, muy a menudo cometemos el error de cosificar el formalismo», afirma. «Empezamos dejando caer en el lenguaje que lo real son los campos cuánticos y que las partículas son excitaciones. Hablamos de partículas virtuales. Pero nada de eso hace clic en ningún detector.»

Los amplitudólogos creen que existe una imagen más veraz y matemáticamente más sencilla de las interacciones entre partículas. En algunos casos, están encontrando que el enfoque de Wigner basado en la teoría de grupos puede también extenderse a las interacciones, sin el galimatías que suelen implicar los campos cuánticos. Lance J. Dixon, destacado amplitudólogo del Centro del Acelerador Lineal de Stanford (SLAC), explica que los teóricos han usado las rotaciones de Poincaré estudiadas por Wigner para deducir directamente la «amplitud a tres puntos», una fórmula que describe la manera en que una partícula puede desintegrarse en dos. También han demostrado que dicha amplitud a tres puntos puede usarse como elemento básico con el que construir las amplitudes a cuatro y más puntos, las cuales corresponden a más partículas. Esas interacciones dinámicas parecen emerger de simetrías básicas.

Para Dixon, lo más emocionante es que las amplitudes de dispersión en las que intervienen gravitones (las hipotéticas partículas transmisoras de la gravedad) resultan ser el cuadrado de las amplitudes en las que intervienen gluones (los transmisores de la interacción nuclear fuerte). Asociamos la gravedad a la estructura del espaciotiempo, mientras que los gluones se propagan en él. A pesar de ello, unos y otros parecen surgir de las mismas simetrías. «Es algo muy extraño. Por supuesto, aún no entendemos en todos sus detalles cuantitativos por qué ambas representaciones son tan diferentes», afirma Dixon.

Por su parte, Arkani-Hamed y sus colaboradores han encontrado nuevos andamiajes matemáticos para llegar directamente a los resultados. Uno de ellos es el «amplituedro», un objeto geométrico que codifica las amplitudes de dispersión de las partículas. Esto abandona la imagen según la cual las partículas colisionan en el espaciotiempo mediante toda una cadena de causas y efectos. «Estamos buscando en el mundo platónico de las ideas estos objetos que automáticamente nos proporcionan propiedades causales», indica Arkani-Hamed. «Entonces podemos decir: "¡Ajá! ahora entiendo por qué esta imagen puede interpretarse como una evolución".»

La línea de investigación basada en qubits y la amplitudología abordan las grandes cuestiones de manera tan diferente que es difícil saber si se complementan o se contradicen. «Al final, la gravedad cuántica tiene alguna estructura matemática que por ahora solo estamos arañando», afirma Engelhardt. La investigadora añade que, en último término, hará falta una teoría cuántica de la gravedad y del espaciotiempo para entender cuáles son los elementos fundamentales del universo a las escalas más básicas: una versión más elaborada de la pregunta de qué es una partícula. Engelhardt reconoce que, por ahora, «la respuesta corta es "no lo sabemos"». IyC

Este artículo apareció originalmente en QuantaMagazine.org, una publicación independiente promovida por la Fundación Simons para potenciar la comprensión pública de la ciencia



PARA SABER MÁS

On unitary representations of the inhomogeneous Lorentz group. Eugene Wigner en *Annals of Mathematics*, vol. 40, págs. 149-204, enero de 1939.
Building up spacetime with quantum entanglement. Mark van Raamsdonk en *General Relativity and Gravitation*, vol. 42, págs. 2323-2329, junio de 2010.
The amplituhedron. Nima Arkani-Hamed y Jaroslav Trnka en *Journal of High Energy Physics*, vol. 2014, art. 30, octubre de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Árboles, bucles y nueva física. Zvi Bern, Lance J. Dixon y David A. Kosower en *IyC*, julio de 2012
Geometría y entrelazamiento cuántico. Juan Maldacena en *IyC*, noviembre de 2015.
Enredados en el espaciotiempo. Clara Moskowitz en *IyC*, marzo de 2017
El código oculto de las partículas. Matthew Von Hippel en *IyC*, abril de 2019.

FÍSICA DE PARTÍCULAS

UN NUEVO MAPA DE LAS PARTÍCULAS Y LAS INTERACCIONES

Muchas representaciones gráficas del modelo estándar omiten aspectos importantes o resultan engañosas. Presentamos una nueva manera de explorar visualmente los constituyentes fundamentales del universo

Natalie Wolchover, Samuel Velasco y Lucy Reading-Ikkanda

Natalie Wolchover
es redactora y editora de *Quanta Magazine*.



Samuel Velasco
es diseñador gráfico de *Quanta Magazine*.



Lucy Reading-Ikkanda
ha trabajado como diseñadora gráfica para *Scientific American* y *Quanta Magazine*, entre otras publicaciones.



Toda la naturaleza surge de un puñado de componentes (las partículas elementales) que interaccionan entre sí en un número reducido de formas. Durante los años setenta del siglo pasado, los físicos desarrollaron un conjunto de ecuaciones para describir esas partículas e interacciones. Tales ecuaciones dan lugar a una sucinta teoría conocida como modelo estándar de la física de partículas.

En el modelo estándar faltan algunas piezas. Por ejemplo, no incluye las hipotéticas partículas que se cree que componen la materia oscura ni las que transmiten la gravedad, y tampoco proporciona una explicación para la masa de los neutrinos. Sin embargo, la teoría sí proporciona una imagen extremadamente precisa de casi todos los demás fenómenos que hemos podido observar.

A pesar de ser un marco conceptual que engloba nuestro conocimiento de la naturaleza a un nivel fundamental, el modelo estándar carece de una visualización coherente. La mayoría de los intentos de representarlo gráficamente son demasiado simples, pasan por alto importantes conexiones internas o resultan extremadamente prolijos y alambicados.

Consideremos la visualización más común, una especie de tabla periódica de las partículas:

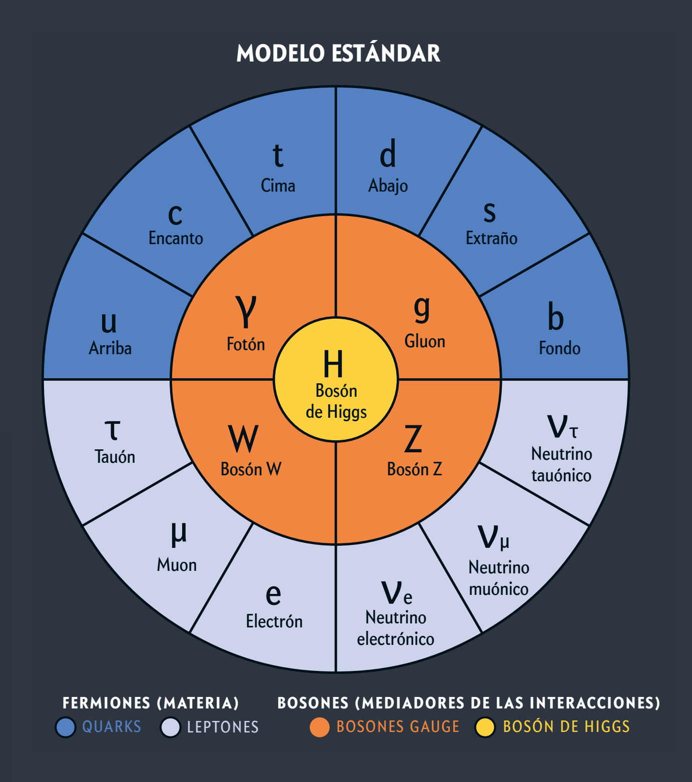
MODELO ESTÁNDAR

	Tres generaciones de materia (fermiones)			Portadores de las interacciones (bosones): Bosones gauge (bosones vectoriales)	Bosones escalares
Quarks	Masa: 2,2* Carga: 2/3 Espín: 1/2 u Arriba	1270 2/3 1/2 c Encanto	173.100 2/3 1/2 t Cima	0 0 1 g Gluon	125.180 0 0 H Bosón de Higgs
Quarks	4,7 −1/3 1/2 d Abajo	96 −1/3 1/2 s Extraño	4180 −1/3 1/2 b Fondo	0 0 1 γ Fotón	
Leptones	0,511 −1 1/2 e Electrón	105,66 −1 1/2 μ Muon	1776,8 −1 1/2 τ Tauón	91.188 0 1 Z Bosón Z	
Leptones	<0,00000012 0 1/2 ν_e Neutrino electrónico	<0,00000012 0 1/2 ν_μ Neutrino muónico	<0,00000012 0 1/2 ν_τ Neutrino tauónico	80,379 +/−1 1 W Bosón W	

* Todas las masas se indican en megaelectronvoltios (MeV/c^2)

Esta tabla no permite entender las relaciones existentes entre las partículas. Las que transmiten las interacciones (el fotón, mediador del electromagnetismo; los bosones *W* y *Z*, responsables de la interacción débil; y los gluones, asociados a la interacción fuerte) aparecen al mismo nivel que las partículas de materia sobre las que actúan (quarks, electrones, etcétera). Además, este esquema deja fuera algunas propiedades clave de las partículas, como el «color».

Otra representación es la desarrollada para la película de 2013 *Particle fever*:



Aunque esta visualización enfatiza adecuadamente el carácter central del bosón de Higgs (el «eje» del modelo estándar, por razones que veremos más adelante), esta partícula aparece al lado del fotón y del gluon, ninguno de los cuales interacciona con ella. Los cuadrantes resultan también engañosos, ya que parecen implicar que, por ejemplo, el fotón interacciona solo con las partículas con las que está en contacto, algo que no es cierto.

UNA NUEVA ESTRATEGIA

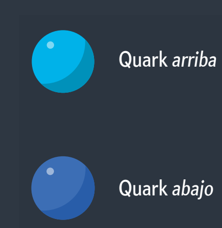
Chris Quigg, físico de partículas del Laboratorio Nacional de Aceleradores Fermi, cerca de Chicago, ha estado pensando durante décadas cómo visualizar el modelo estándar. Su esperanza es que una representación gráfica más elaborada ayude a familiarizarse con las partículas ya conocidas e impulse nuevas ideas para acomodarlas en un marco teórico más amplio. Hace unos años, Quigg propuso un esquema que hacía mucho más explícitos el orden y la estructura del modelo estándar. Lo denominó «representación de doble símplice», ya que en él las partículas dextrógiras y levógiras forman sendos «símplices», una generalización de un triángulo.

Para elaborar nuestra infografía hemos adoptado el esquema de Quigg con algunas modificaciones. Los sucesivos pasos mostrados a continuación indican cómo construir el doble símplice desde el principio.

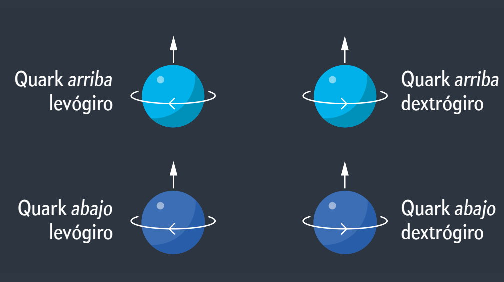
1. LOS QUARKS AL FONDO

Las partículas de materia se clasifican en dos clases: leptones y quarks. Cada tipo de partícula de materia existente en la naturaleza tiene una homóloga de antimateria con la misma masa pero opuesta en todo lo demás. Al igual que en otras visualizaciones del modelo estándar, aquí no incluiremos la antimateria, la cual formaría un segundo doble símplice invertido.

Comencemos con los quarks y, en particular, con las dos variedades que componen los protones y los neutrones: el quark *arriba*, cuya carga eléctrica es igual a +2/3; y el quark *abajo*, con carga eléctrica −1/3.



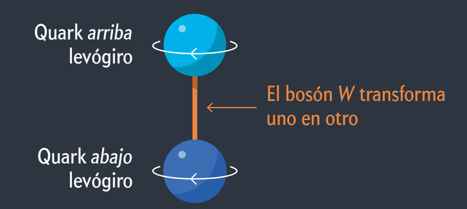
A su vez, ambos tipos de quarks pueden ser «dextrógiros» o «levógiros». Esta es una importante propiedad matemática que, para partículas sin masa, corresponde a que su espín esté alineado o antialineado con la dirección de movimiento.



2. CAMBIOS DÉBILES

Los quarks *arriba* y *abajo* levógiros pueden transformarse unos en otros mediante la interacción débil. Esto ocurre cuando el quark emite o absorbe un bosón *W*, uno de los mediadores de dicha interacción, cuya carga eléctrica puede ser +1 o −1. Estas interacciones débiles quedarán representadas por una línea naranja.

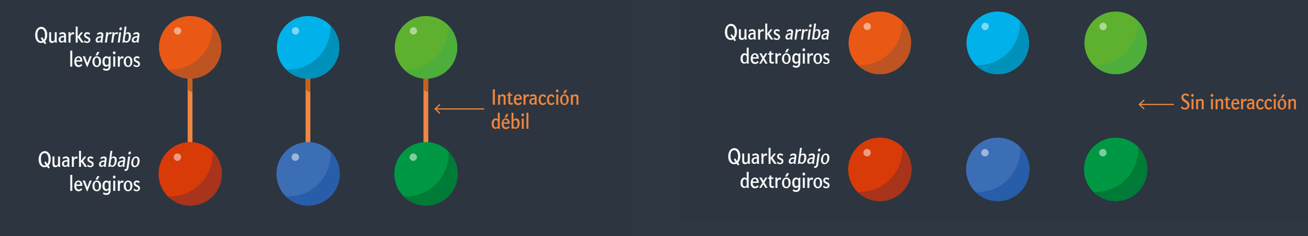
Curiosamente, los bosones *W* solo interaccionan con los quarks levógiros. Eso significa que los quarks *arriba* y *abajo* dextrógiros no pueden absorber ni emitir bosones *W* y, por tanto, no pueden transformarse uno en otro.





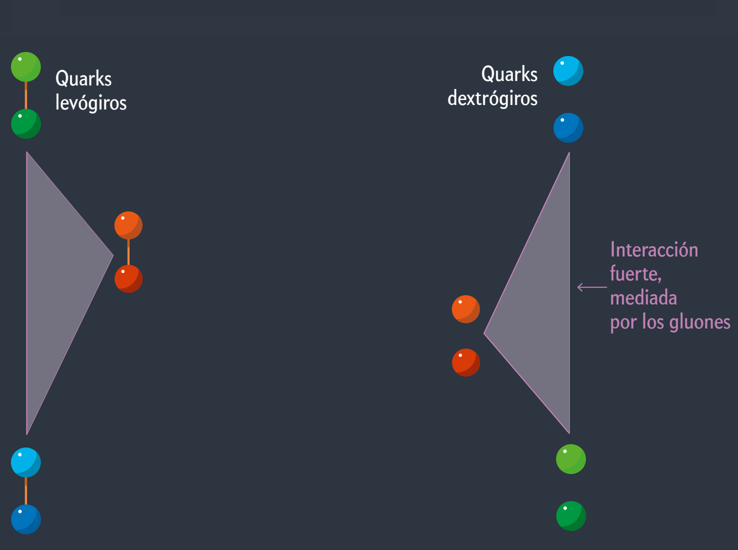
3. COLORES FUERTES

Los quarks poseen, además, un tipo de carga denominada «color», la cual puede ser de tres tipos: «rojo», «azul» y «verde». Es esta propiedad la que hace que los quarks sean sensibles a la interacción fuerte.



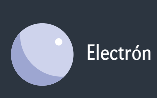
La interacción fuerte liga entre sí quarks con diferente carga de color para formar partículas como los protones y los neutrones, las cuales son «incoloras»; es decir, no poseen carga neta de color.

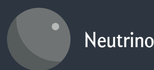
Los quarks pueden cambiar su carga de color cuando absorben o emiten gluones, las partículas encargadas de transmitir la interacción fuerte. Estas interacciones quedarán representadas como los lados de un triángulo. Dado que los gluones también tienen carga de color, interaccionan continuamente entre sí, además de con los quarks. En nuestro gráfico, las interacciones entre gluones llenan el interior de cada triángulo.



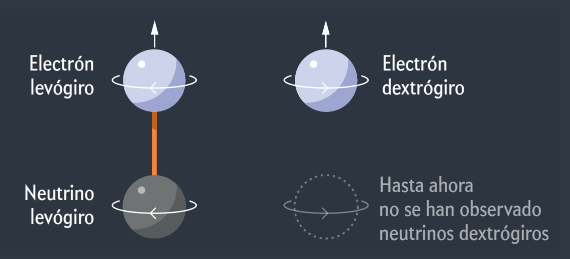
4. MÁS MATERIA

Consideremos ahora los leptones, la otra familia de partículas de materia. Existen dos tipos: electrones, con carga eléctrica –1, y neutrinos, que son eléctricamente neutros.





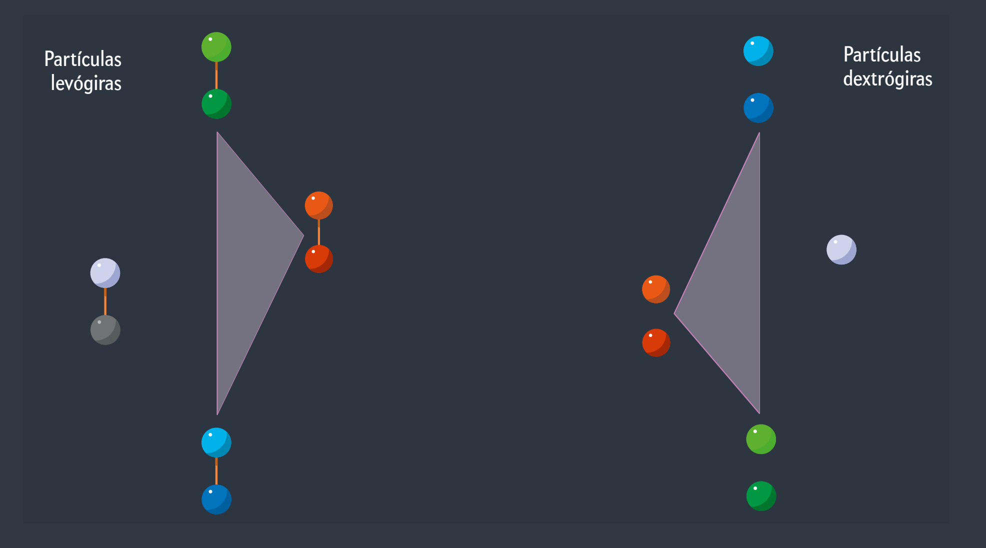
Al igual que los quarks *arriba* y *abajo* levógiros, el electrón y el neutrino levógiro pueden transformarse uno en otro mediante la interacción débil. Hasta ahora, sin embargo, no se han observado neutrinos dextrógiros.



Es importante señalar que los leptones carecen de carga de color, por lo que no experimentan la interacción fuerte. Esta es la principal característica que los distingue de los quarks.

5. EL ESQUELETO DEL SÍMPLICE

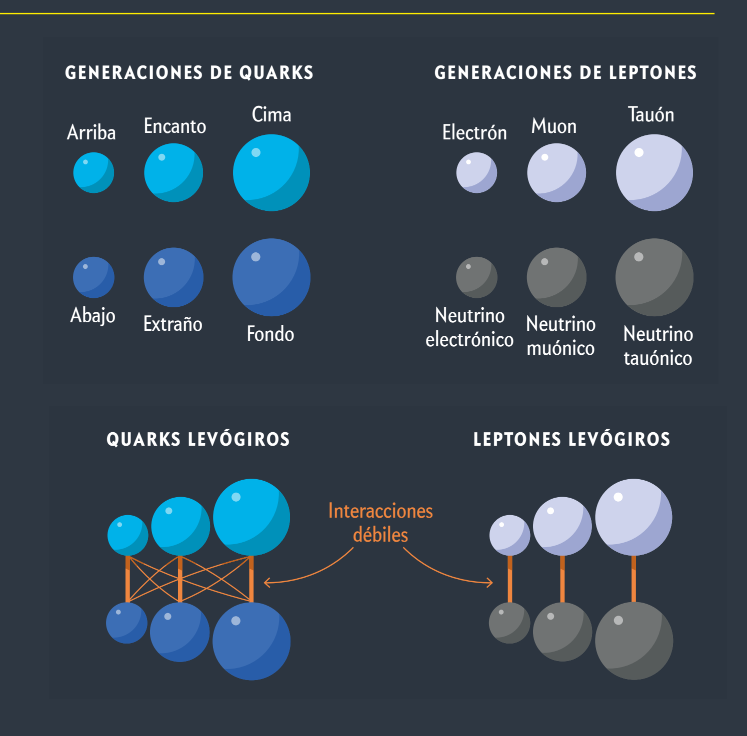
Si juntamos todo lo que hemos hecho hasta ahora, tendremos las partículas levógiras a la izquierda y a las dextrógiras a la derecha. Esto constituye el esqueleto básico del doble símplice de Quigg.



6. TRES GENERACIONES

Ahora hemos de incluir una complicación: por razones que nadie conoce, en la naturaleza existen tres versiones de cada tipo de partícula de materia. Estas réplicas son idénticas entre sí salvo por el hecho de que sus masas son progresivamente mayores. Por ejemplo, además de los quarks *arriba* y *abajo*, existen también los quarks *encanto* y *extraño*, y los aún más masivos *cima* y *fondo*. Lo mismo ocurre con los leptones: además del electrón y el neutrino electrónico, existen también el muon y el neutrino muónico, así como el tauón y el neutrino tauónico. Las masas de los neutrinos son extremadamente pequeñas y sus valores precisos aún se desconocen.

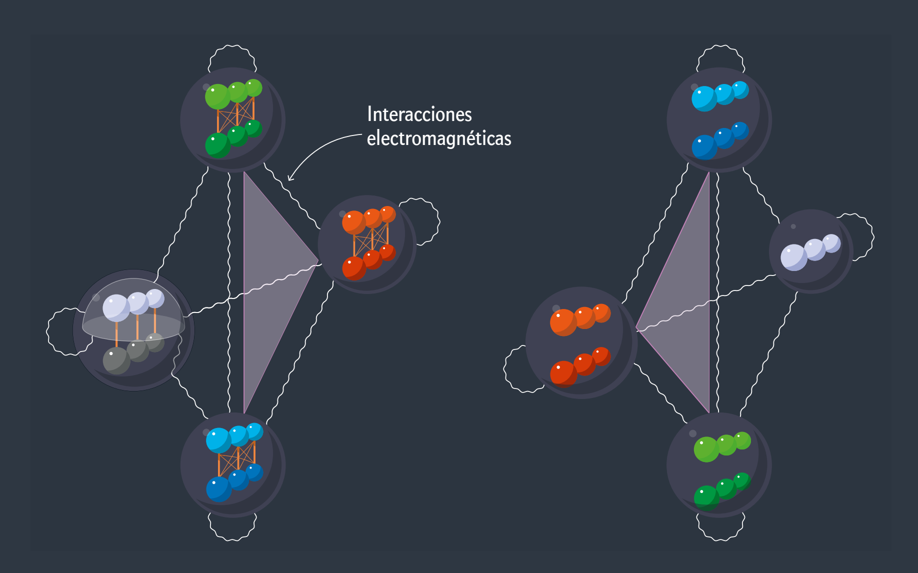
Todas estas partículas se sitúan en las esquinas del doble símplice. Otro aspecto importante es que existe una pequeña interacción débil entre los quarks levógiros de las diferentes generaciones. Por ejemplo, un quark *arriba* puede emitir un bosón W^+ (es decir, con carga positiva) y convertirse en un quark *extraño*. Hasta ahora, no se ha constatado que los leptones de diferentes generaciones muestren este comportamiento.



7. INTERACCIONES Y CARGAS

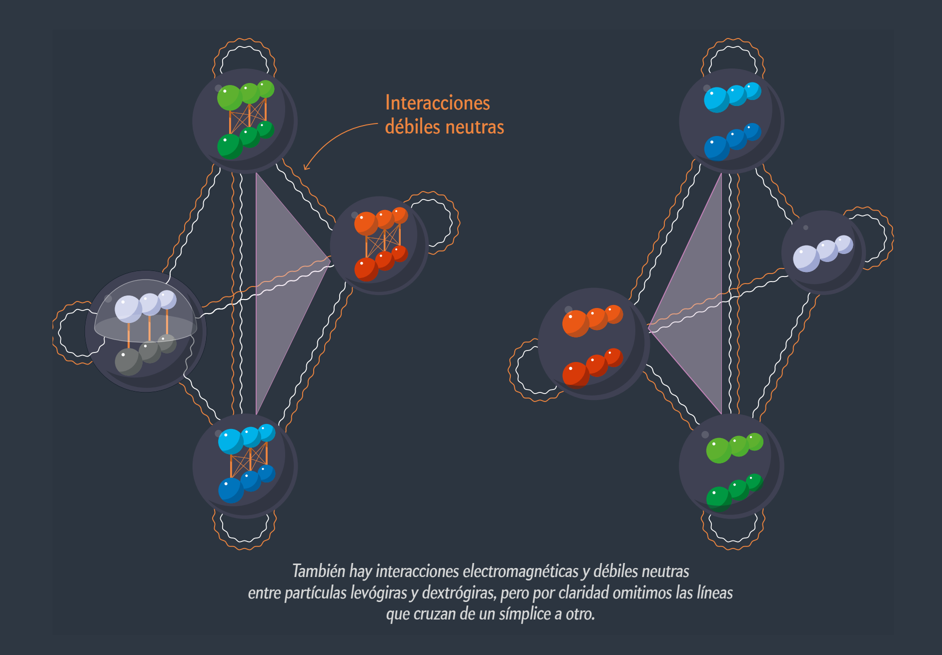
¿De qué otra forma pueden interaccionar las partículas? Hemos mencionado que un buen número de ellas (de hecho, todas menos los neutrinos) poseen carga eléctrica. Eso significa que son sensibles a la fuerza electromagnética: pueden interaccionar entre sí intercambiando fotones.

En nuestro doble símplice, esta interacción quedará representada mediante líneas onduladas que conectan las partículas con carga eléctrica. Estas interacciones no transforman unas partículas en otras, solo hacen que las partículas se atraigan o se repelan.



Por otro lado, la interacción débil es algo más compleja de lo que dejamos entrever antes. Además de los bosones W^+ y W^-, existe un bosón intermediario neutro llamado Z^0. Las partículas pueden absorber o emitir un bosón Z^0 sin cambiar su identidad.

Al igual que en el caso de la interacción electromagnética, estas «interacciones débiles neutras» simplemente hacen que la partícula gane o pierda energía y momento. Las interacciones débiles neutras quedarán representadas por líneas onduladas de color naranja.



También hay interacciones electromagnéticas y débiles neutras entre partículas levógiras y dextrógiras, pero por claridad omitimos las líneas que cruzan de un símplice a otro.

No es casual que las interacciones débiles neutras se parezcan tanto a las electromagnéticas. En realidad, las interacciones débil y electromagnética provienen de una única fuerza que solo existió como tal durante los primeros instantes del universo: la interacción electrodébil. A medida que el universo se enfriaba, tuvo lugar un fenómeno conocido como «ruptura de la simetría electrodébil», el cual causó que esa interacción original se separara en dos. Dicho suceso vino marcado por un cambio repentino en el campo de Higgs, el cual impregna todo el espacio y se encuentra asociado a la pieza final de nuestro rompecabezas.

8. EL BOSÓN DE HIGGS

Esta partícula puede considerarse el eje del modelo estándar y la clave por la que la estructura de doble símplice tiene sentido. Cuando el campo de Higgs «se condensó» en el universo primitivo, conectó las partículas dextrógiras con las levógiras y les hizo adquirir la propiedad que denominamos masa. (Es importante señalar que, aunque los neutrinos poseen una pequeña masa, el origen de esta sigue siendo un misterio que bien podría deberse a un mecanismo totalmente distinto.)

Podemos esbozar una explicación simplificada de cómo funciona este mecanismo de generación de masa. Cuando una partícula se mueve a través del espacio, interacciona constantemente con el campo de Higgs. Esa interacción hace que un electrón levógiro se convierta en uno dextrógiro, después en otro levógiro, y así sucesivamente. Tales cambios «frenan» el electrón, y es esta característica lo que interpretamos como masa. En general, cuanto más intensa sea la interacción entre una partícula y el campo de Higgs, mayor será su masa. Y, de hecho, estas interacciones constantes hacen que una partícula con masa sea en realidad una mezcla de sus componentes levógira y dextrógira.

Llegados aquí, tenemos por fin nuestra visualización del modelo estándar de la física de partículas:

PARTÍCULAS LEVÓGIRAS
Quarks verdes
Interacciones débiles neutras
Quarks rojos
Interacciones electromagnéticas
Bosón de Higgs
Leptones
Interacciones débiles cargadas
Quarks azules
PARTÍCULAS DEXTRÓGIRAS
Interacciones fuertes
Interacciones de Higgs



Este artículo apareció originalmente en QuantaMagazine.org, una publicación independiente promovida por la Fundación Simons para potenciar la comprensión pública de la ciencia

PARA SABER MÁS

The double simplex. Chris Quigg en **arxiv.org/abs/hep-ph/0509037**, septiembre de 2005.

EN NUESTRO ARCHIVO

Teorías gauge de las fuerzas entre partículas elementales. Gerard 't Hooft en *IyC*, agosto de 1980.
Mensajeros fantasmales de nueva física. Martin S. Hirsch, Heinrich Päs y Werner Porod en *IyC*, junio de 2013.
De la superconductividad al bosón de Higgs. Miguel Ángel Vázquez-Mozo en *IyC*, abril de 2015.





ALTAS ENERGÍAS

UNA NUEVA MANERA DE ACELERAR PARTÍCULAS

Una vez halladas todas las piezas del modelo estándar, descubrir nuevas partículas elementales podría requerir una tecnología revolucionaria

Chandrashekhar Joshi

Ilustración de Peter y Maria Hoey

Chandrashekhar Joshi es catedrático de ingeniería eléctrica en la Universidad de California en Los Ángeles, donde dirige el Grupo de Láseres y Plasmas. Ha sido galardonado con el premio James Clerk Maxwell en física de plasmas otorgado por la Sociedad Americana de Física.





A PRINCIPIOS DEL SIGLO XX, LOS CIENTÍFICOS APENAS CONOCÍAN LOS COMPONENTES esenciales del mundo físico. Sin embargo, a finales de siglo no solo habían descubierto todos los elementos químicos que componen la materia observable, sino también una gran cantidad de partículas aún más fundamentales y que dan lugar a nuestro universo, a nuestro planeta y a nosotros mismos. La herramienta responsable de esta revolución fue el acelerador de partículas.

El momento cumbre de los aceleradores de partículas llegó en 2012, cuando el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) descubrió el largamente buscado bosón de Higgs. El LHC es un anillo acelerador de 27 kilómetros situado en el CERN, cerca de Ginebra. En él se hacen chocar dos haces de protones con una energía de unos 7 billones de electronvoltios (TeV) cada uno. Se trata del instrumento científico más grande, más complejo y posiblemente más caro jamás construido. El bosón de Higgs era la última pieza del modelo estándar, la teoría actual de la física de partículas. No obstante, en los casi diez años transcurridos desde ese hallazgo, no ha aparecido ninguna otra partícula elemental, ni en ese acelerador ni en ningún otro.

¿Hemos descubierto ya todas las partículas que cabía encontrar? Es poco probable. El modelo estándar no incluye la materia oscura, una sustancia que abunda en el universo pero que se cree formada por partículas invisibles. Una extensión popular del modelo estándar, la supersimetría, predice muchas más partículas de las que conocemos. Y otras preguntas profundas siguen también sin respuesta; entre ellas, si existen dimensiones adicionales del espacio, o por qué en el universo observable hay una marcada asimetría entre la materia y la antimateria. Para resolver estos enigmas, es muy posible que necesitemos un colisionador de partículas más potente que los actuales.

Numerosos científicos apoyan el proyecto conocido como Colisionador Lineal Internacional (ILC), un acelerador rectilíneo que produciría colisiones a una energía de 250.000 millones de electronvoltios (GeV). Aunque no sería tan potente como el LHC, el ILC haría chocar electrones y positrones, sus homólogos de antimateria. Y dado que, al contrario que el protón, estas partículas son fundamentales, cabe esperar que generen datos mucho más «limpios» que las colisiones que se llevan a cabo en el LHC. Pero, por desgracia, el diseño del ILC requiere una instalación de unos 20 kilómetros de largo y su coste previsto supera los 8500 millones de euros, un precio tan elevado que hasta ahora ningún país se ha comprometido a acogerlo.

Entretanto, hay planes para aumentar la energía del LHC hasta los 27 TeV en el túnel actual aumentando la intensidad de los imanes superconductores que sirven para curvar la trayectoria de los protones. Además, el CERN ha propuesto un colisionador electrón-positrón y protón-protón de 100 kilómetros de circunferencia, denominado Futuro Colisionador Circular (FCC). Tal instrumento podría alcanzar la insólita energía de 100 TeV. Sin embargo, es probable que cueste tanto o más que el ILC. E incluso si acaba construyéndose, no sería posible comenzar a trabajar en él hasta pasado 2035, cuando el LHC dejará de operar.

No obstante, estos descomunales y caros instrumentos no son la única opción de la que disponen los físicos de partículas. Desde los años ochenta se han estado desarrollando ideas alternativas para seguir investigando el mundo subatómico. Una de ellas es la de un acelerador basado en plasma: una propuesta muy prometedora para lograr un colisionador con energías del orden del TeV que podría ser más compacto y mucho más económico que los actuales.

UNA SELVA DE PARTÍCULAS

La historia de los aceleradores de partículas comenzó en 1897 en el Laboratorio Cavendish de la Universidad de Cambridge. Allí, J. J. Thomson creó la primera versión de un acelerador de partículas a partir de un tubo de rayos catódicos «de sobremesa», como los que usaban la mayoría de los televisores antes de que llegaran las pantallas planas. Gracias a él descubrió una partícula con carga negativa: el electrón.

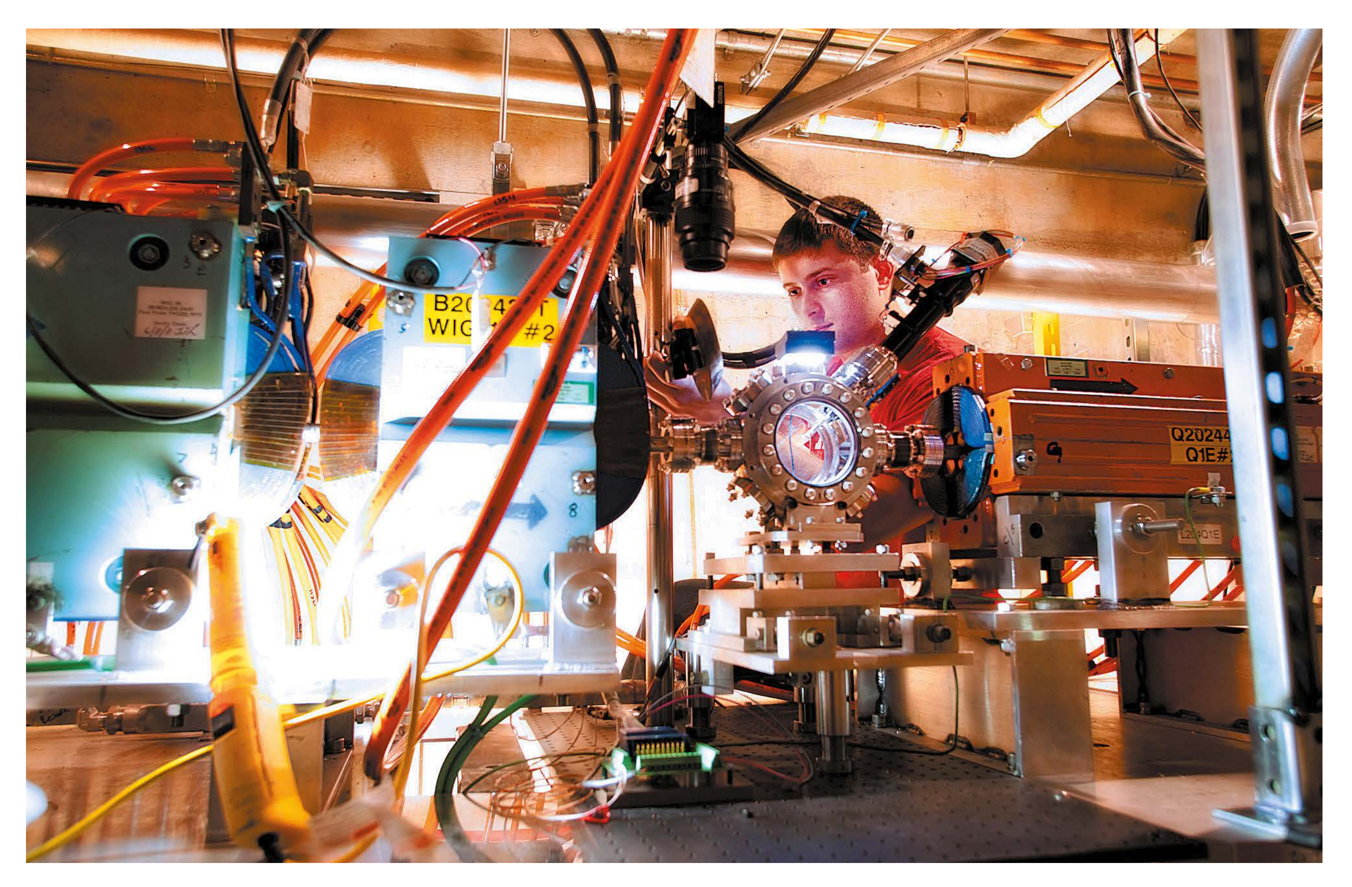
Los físicos no tardaron en identificar los otros dos componentes atómicos, el protón y el neutrón, al bombardear átomos con partículas radiactivas. En los años treinta llegó el primer acelerador de partículas circular, el ciclotrón, un dispositivo inventado por Ernest Lawrence que cabía en la palma de la mano y que podía acelerar protones hasta unos 80.000 electronvoltios. Desde entonces, los aceleradores evolucionaron deprisa y los científicos pudieron aumentar la energía de las partículas

EN SÍNTESIS

En 2012, el hallazgo del bosón de Higgs en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN permitió completar el modelo estándar de la física de partículas. Sin embargo, desde entonces no se han descubierto nuevas partículas elementales.

Encontrar la siguiente partícula elemental podría requerir construir aceleradores mucho más potentes que el LHC. Pero, con las técnicas actuales, el tamaño y el coste de una máquina semejante comienzan a tonarse prohibitivos.

Una nueva técnica, la aceleración basada en plasma, promete alcanzar energías muy elevadas con instrumentos mucho menores y más baratos que las actuales. Con todo, llevarla a la práctica aún exigirá sortear varios obstáculos.



UN CIENTÍFICO prueba un prototipo de acelerador de plasma en la Instalación para Pruebas Experimentales de Aceleradores Avanzados (FACET) del Laboratorio Nacional de Aceleradores SLAC, en California.

BRAD PLUMMER Y LABORATORIO NACIONAL DE ACELERADORES SLAC

cargadas. Estos avances condujeron al descubrimiento de una «selva» de cientos de partículas subnucleares, lo que marcó el comienzo de la era de la física de altas energías basada en aceleradores. En el último cuarto del siglo pasado, la energía de los aceleradores aumentó rápidamente y se demostró que las partículas de esa selva estaban compuestas por tan solo 17 partículas elementales. Todas ellas, a excepción del bosón de Higgs, ya se habían descubierto en experimentos con aceleradores a finales de los años noventa. En 2012, el hallazgo del bosón de Higgs en el LHC convirtió al modelo estándar en la joya de la corona de la física de partículas moderna.

Además de estar entre los instrumentos científicos más exitosos de la historia, los aceleradores han encontrado multitud de aplicaciones en medicina y en nuestra vida cotidiana. Se emplean en los escáneres de tomografía computarizada, en las radiografías óseas y en la radioterapia de tumores malignos. Son vitales en la esterilización de alimentos y para generar isótopos radiactivos usados en una miríada de pruebas y tratamientos médicos. Y constituyen la base de los láseres de electrones libres de rayos X, con los que miles de científicos e ingenieros realizan investigaciones punteras en las ciencias físicas y de la vida.

EL FUNDAMENTO DE LOS ACELERADORES

Los aceleradores pueden tener dos formas: circulares (sincrotrones) o lineales (linacs). Todos ellos funcionan con ondas de radio o microondas, las cuales aceleran las partículas hasta velocidades cercanas a la de la luz. En el LHC, por ejemplo, dos haces de protones que circulan en direcciones opuestas pasan una y otra vez por las llamadas cavidades de radiofrecuencia, espaciadas a lo largo del anillo. Las ondas de radio de dichas cavidades generan campos eléctricos cuyo sentido oscila para asegurar que los protones, de carga positiva, siempre experimenten un tirón hacia adelante. Ello acelera los protones y les transfiere energía. Una vez que las partículas han adquirido la energía suficiente, unas lentes magnéticas envían los haces de protones a varios puntos de colisión muy precisos situados a lo largo del anillo. Al chocar, se producen densidades de energía extremadamente altas, lo que permite crear nuevas partículas con una masa muy superior a la del protón.

Sin embargo, cuando una partícula con carga eléctrica describe una trayectoria circular, emite la llamada «radiación de sincrotrón». Con independencia del radio del anillo, esa pérdida de energía es mucho menor para las partículas más masivas, como los protones, lo que explica por qué en el LHC se hacen colisionar estas partículas. Sin embargo, los electrones sufren pérdidas demasiado elevadas, en especial a medida que su energía aumenta. Por ello, cualquier futuro acelerador que pretenda hacer chocar electrones y positrones deberá ser un colisionador lineal o alcanzar un radio enorme que minimice la curvatura y, con ello, la radiación que liberan los electrones.

Para una determinada energía del haz, el tamaño de un acelerador depende, en última instancia, de la cantidad de energía de radiofrecuencia que se puede inyectar en la estructura antes de que esta sufra una ruptura eléctrica. En los aceleradores tradicionales, esa estructura está hecha de cobre, y el umbral de ruptura supone que pueden aportar como máximo una energía

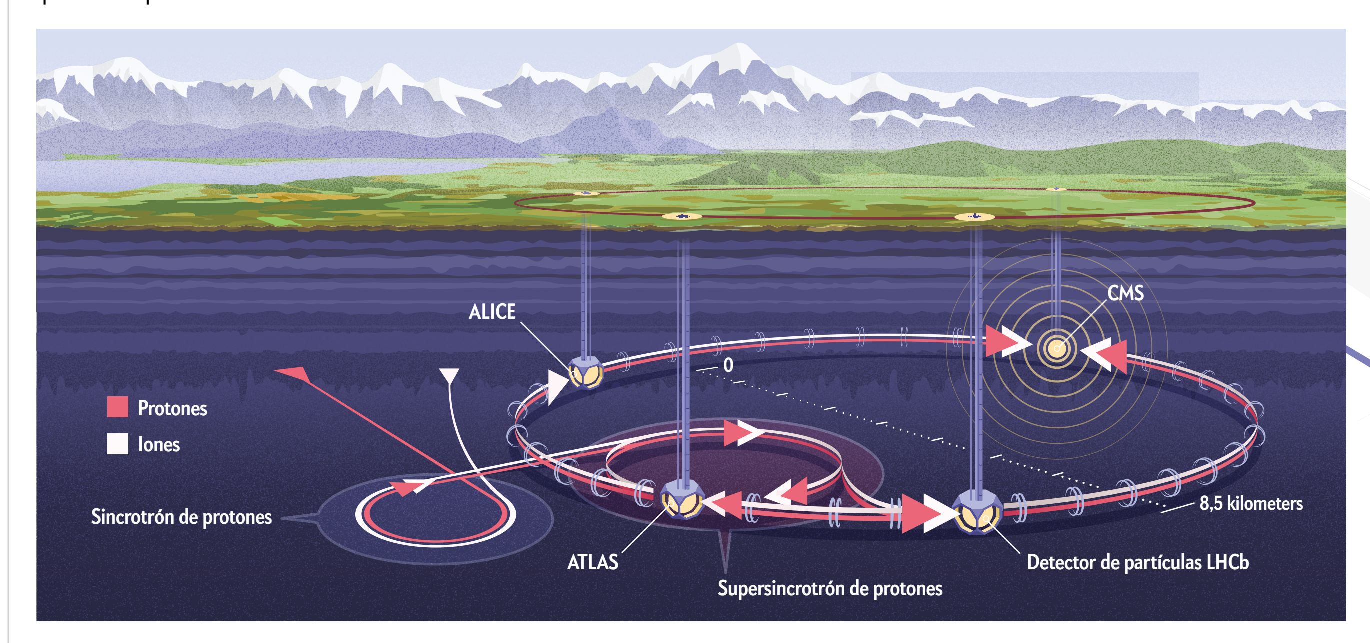
Continúa en la página 42

Nuevos aceleradores de partículas

La mayoría de los aceleradores construidos hasta ahora usan ondas de radio o microondas para acelerar las partículas cargadas. Luego hacen que estas choquen entre sí, lo que libera grandes cantidades de energía y permite crear nuevas partículas. El instrumento más avanzado de este tipo es el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN (*izquierda, arriba*). Sin embargo, el tamaño y el coste de sus posibles sucesores (*izquierda, abajo*) podrían resultar prohibitivos. A fin de alcanzar las energías necesarias a un coste asumible, se han propuesto nuevas técnicas, como la aceleración de campo de estela de plasma (*derecha*).

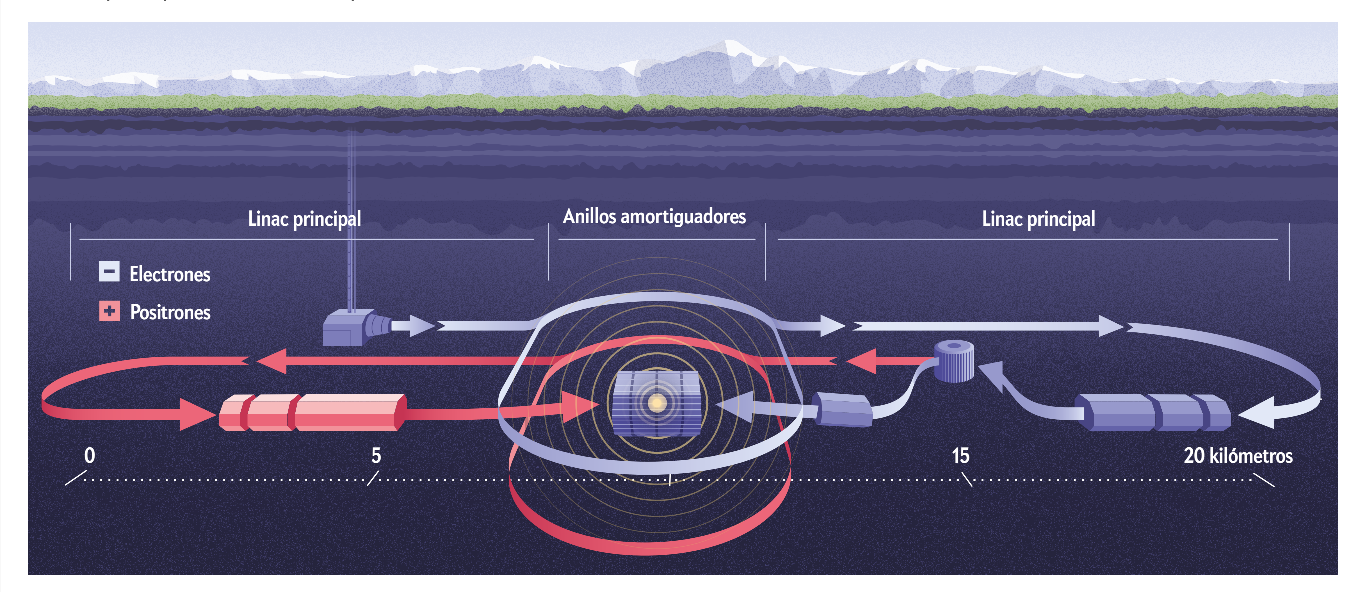
EL LÍDER ACTUAL: GRAN COLISIONADOR DE HADRONES (LHC)

Este anillo subterráneo de 27 kilómetros, el acelerador de partículas más grande y potente jamás construido, puede hacer chocar protones con una energía total de hasta 14 billones de electronvoltios (TeV). Situado cerca de Ginebra y con un coste de 4000 millones de euros, acoge cuatro experimentos. Su mayor logro fue el hallazgo del bosón de Higgs en 2012. Se ha propuesto aumentar la potencia de sus imanes superconductores para alcanzar energías de 27 TeV, lo que abriría la puerta a nuevos descubrimientos.



EN LISTA DE ESPERA: COLISIONADOR LINEAL INTERNACIONAL (ILC)

Este futuro acelerador lineal haría chocar electrones y positrones, sus homólogos de antimateria. El instrumento, de 20 kilómetros de longitud, operaría a energías menores (250 gigaelectronvoltios) que el LHC, pero produciría datos más «limpios». Sin embargo, su coste estimado es de unos 8500 millones de euros, por lo que hasta ahora ningún país se ha decidido a acogerlo.



Cuando un pulso láser o de electrones («pulso inductor») atraviesa un plasma, los electrones de este se ven expelidos hacia fuera. Cuando dicho pulso sigue su camino, el plasma, ahora desprovisto de electrones y con carga positiva, atrae los electrones desplazados. Estos se precipitan sobre el eje de la estela, lo sobrepasan y vuelven a ser atraídos hacia atrás, lo que genera un campo eléctrico oscilante. Si un segundo paquete de electrones («pulso posterior») atraviesa el plasma, se verá acelerado por dicho campo eléctrico.

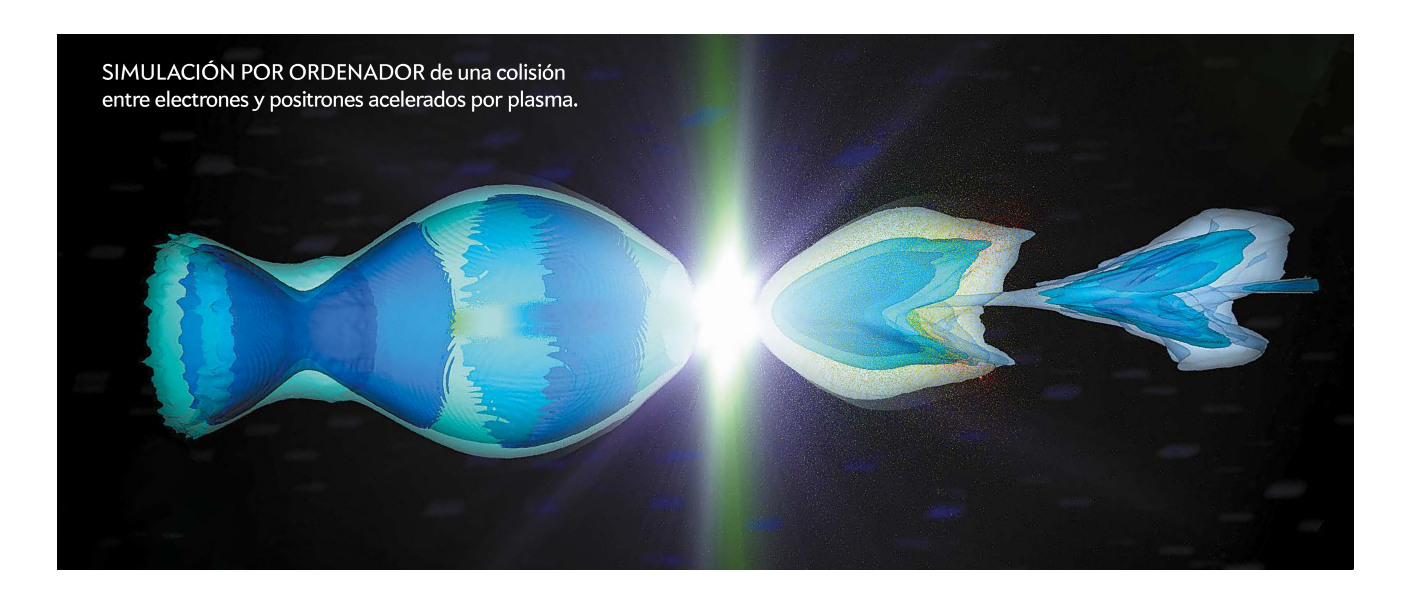
Plasma
Electrones
Envoltura de electrones
Pulso posterior
Pulso inductor
Burbuja de iones
Plasma

3
2
1
0
kilómetros
Elementos ópticos intermedios
Módulo de aceleración por plasma
Inductor
Anillo amortiguador

APUESTA DE FUTURO: ACELERADOR DE CAMPO DE ESTELA DE PLASMA

La aceleración por plasma ofrece la posibilidad de obtener energías muy elevadas a un coste menor que el de los aceleradores tradicionales. Un futuro instrumento de este tipo podría conectar en serie unas 50 etapas de aceleración y obtener electrones entre 1000 o incluso 10.000 veces más rápidos que en los aceleradores al uso, lo que permitiría lograr colisiones de 1 TeV. Con una longitud de unos pocos kilómetros, sería mucho más compacto que los instrumentos actuales. Por ahora la técnica de plasma ha experimentado grandes avances, pero aún necesita varias mejoras para resultar viable.

NICK BOCKELMAN



Viene de la página 39
de entre 20 y 50 millones de electronvoltios (MeV) por metro. Los científicos han experimentado con nuevas estructuras que operan a frecuencias más altas, lo que aumenta el umbral de ruptura. También han trabajado para incrementar la intensidad de los campos aceleradores en el interior de las cavidades superconductoras que hoy se emplean de forma rutinaria tanto en los sincrotrones como en los linacs. Todos estos constituyen avances importantes, y casi seguro se implementarán antes de que cualquier concepto revolucionario altere las muy exitosas técnicas de aceleración habituales. Pero, con el tiempo, puede que necesitemos otras estrategias.

En 1982, el programa de física de altas energías del Departamento de Energía de Estados Unidos puso en marcha una modesta iniciativa para investigar formas totalmente nuevas de acelerar partículas cargadas. Dicho programa generó muchas ideas, tres de las cuales parecen especialmente prometedoras. La primera se conoce como aceleración de dos haces. Este enfoque emplea un pulso de electrones con una densidad de carga muy elevada para crear radiación de alta frecuencia en una cavidad. Luego, transfiere esa radiación a otra cavidad para acelerar un pulso de electrones secundario. Este concepto se pondrá a prueba en el CERN, en un instrumento llamado Colisionador Lineal Compacto (CLIC).

Otra idea consiste en hacer colisionar muones. Estas partículas son casi idénticas a los electrones, solo que mucho más masivas, gracias a lo cual pueden acelerarse en un anillo sin que pierdan tanta energía por radiación de sincrotrón. El inconveniente es que los muones son inestables, con una vida media de unas dos millonésimas de segundo. Se crean durante el proceso de desintegración de otras partículas llamadas piones, las cuales deben generarse a su vez lanzando un intenso haz de protones contra cierto material. Y aunque hasta ahora nunca se ha construido un colisionador de muones, entre los expertos en aceleradores hay defensores acérrimos de esta idea.

Por último está la aceleración basada en plasma. La idea surgió en los años setenta, cuando John M. Dawson, de la Universidad de California en Los Ángeles, propuso utilizar la estela de plasma producida por un intenso pulso láser o un paquete de electrones para acelerar un segundo paquete de partículas. Gracias a ello, la aceleración experimentada por estas últimas podría ser entre 1000 y 10.000 mayor que la lograda por el método habitual. La idea pasó a conocerse como «acelerador de campo de estela de plasma» y generó una gran expectación, dado que sugería la posibilidad de reducir el gigantesco tamaño de los aceleradores tradicionales, de manera análoga a como los circuitos integrados sirvieron para miniaturizar la electrónica a partir de los años sesenta.

EL CUARTO ESTADO DE LA MATERIA

La mayoría de nosotros estamos familiarizados con tres estados de la materia: sólido, líquido y gas. El plasma, por su parte, se describe a menudo como el cuarto estado de la materia. Aunque no sea habitual en nuestra experiencia cotidiana, se trata del estado de agregación más común en el universo: según algunos cálculos, más del 99 por ciento de toda la materia visible del cosmos se encuentra en estado de plasma. Las estrellas, por ejemplo, están compuestas de plasma. Este es básicamente un gas ionizado con la misma densidad de electrones que de iones. En el laboratorio, es sencillo generar plasma haciendo pasar electricidad a través de un gas, como ocurre en los tubos fluorescentes de algunas lámparas.

Los aceleradores de campo de estela de plasma aprovechan el mismo tipo de estela que podemos observar tras una lancha o un avión a reacción. Cuando una embarcación avanza, desplaza el agua, la cual se mueve detrás del barco y forma una estela. Del mismo modo, un pulso láser muy colimado e intenso que atraviesa un plasma puede generar una estela relativista (es decir, que se propaga a casi la velocidad de la luz) al ejercer presión de radiación y apartar de su camino los electrones. Si, en vez de un pulso láser, enviamos un paquete de electrones de alta energía, su carga negativa expulsa a los electrones del plasma, ya que estos experimentan una fuerza repulsiva. Los iones, en cambio, más masivos y con carga positiva, permanecen inmóviles. Tras el paso del pulso, los electrones expulsados se ven atraídos de nuevo hacia los iones. Sin embargo, se mueven tan deprisa que se pasan de largo y comienzan a sentir una atracción hacia atrás, con lo que se establece una estela oscilante. Debido a la separación entre los electrones y los iones del plasma, se genera un campo eléctrico en el interior de esa estela.

Si a este primer pulso, llamado «inductor» (*drive pulse*), le sigue un segundo pulso «posterior» (*trailing pulse*), los electrones de este último pueden obtener energía de la estela, del mismo modo que en los aceleradores habituales la extraen de

F. TSUNG, W. AN/UNIVERSIDAD DE CALIFORNIA EN LOS ÁNGELES Y LABORATORIO NACIONAL DE ACELERADORES SLAC

las ondas de radiofrecuencia. Si hay suficientes electrones en el paquete posterior, pueden absorber tanta energía de la estela como para amortiguar el campo eléctrico. En tal caso, todos los electrones del paquete posterior experimentan un campo de aceleración constante y ganan energía al mismo ritmo, lo que reduce la dispersión de energía del haz.

La ventaja principal de los aceleradores de plasma es que los campos eléctricos en la estela pueden ser unas mil veces más intensos que los de las cavidades de radiofrecuencia tradicionales. Además, el paquete posterior puede extraer una fracción muy importante de la energía que el haz inductor transfiere a la estela. Gracias a estos efectos, un colisionador de este tipo podría ser mucho más compacto y económico que los instrumentos habituales.

EL FUTURO DEL PLASMA

Los aceleradores de campo de estela de plasma impulsados por láser o por electrones han logrado enormes progresos en las dos últimas décadas. Mi equipo de la Universidad de California en Los Ángeles ha llevado a cabo experimentos con varios prototipos junto a los físicos del Laboratorio Nacional de Aceleradores SLAC, en California, en la Instalación para Pruebas Experimentales de Aceleradores Avanzados (FACET) de Menlo Park. En esas pruebas, inyectamos paquetes de electrones inductores y posteriores con una energía inicial de 20 GeV, y hallamos que los electrones posteriores ganaban hasta 9 GeV después de atravesar 1,3 metros de plasma. En otro experimento conseguimos un aumento de 4 GeV en un haz de positrones usando tan solo un metro de plasma. Otros laboratorios de todo el mundo han empleado estelas generadas por láser para producir incrementos de energía de varios GeV en paquetes de electrones.

El objetivo último es construir un acelerador lineal que haga chocar haces de electrones y positrones (o dos haces de electrones) muy colimados con una energía total superior a 1 TeV. Para lograrlo, es probable que necesitáramos conectar en serie unas 50 etapas de aceleración de plasma, cada una de las cuales aportaría una energía de 10 GeV. Sin embargo, alinear y sincronizar los haces inductor y posterior a través de tantas etapas de aceleración de plasma para conseguir que las partículas choquen con la precisión deseada supone un enorme reto. El radio típico de la estela es inferior al milímetro, y el paquete posterior de electrones debe inyectarse con una precisión de menos de una micra. Además, el pulso inductor y el haz posterior han de estar sincronizados con una precisión superior a una centésima de billonésima de segundo. Cualquier desajuste degradaría la calidad del haz e implicaría una pérdida de energía y de carga, debido a la oscilación de los electrones alrededor del eje de la estela. Esa pérdida tiene lugar mediante la emisión de rayos X duros, conocida como emisión de betatrón, e impone un límite finito a la cantidad de energía que es posible obtener de un acelerador de plasma.

Hay otros obstáculos técnicos que, en estos momentos, impiden obtener un acelerador de plasma. Por ejemplo, el parámetro principal de la calidad de un colisionador de partículas es la luminosidad: una medida de cuántas partículas pueden hacerse pasar a través de un espacio determinado en un tiempo dado. La luminosidad multiplicada por la «sección eficaz» (en esencia, la probabilidad de que dos partículas choquen) indica cuántas colisiones de un cierto tipo es probable observar por segundo a una energía dada. Para un colisionador lineal electrón-positrón de 1 TeV, la luminosidad deseada asciende a 10^{34} $cm^{-2}s^{-1}$. Para alcanzarla, los haces que chocan deberían tener una potencia media de 20 megavatios cada uno, lo que equivale a 10^{10} partículas por paquete con una tasa de repetición de 10 kilohercios, y el tamaño del haz en el punto de colisión tendría que ser de decenas de milmillonésimas de metro. Para ilustrar cuán difícil es esto, centrémonos en el requisito de la potencia media. Incluso si pudiéramos transferir la energía del haz inductor al posterior con una eficiencia del 50 por ciento, 20 megavatios de potencia se quedarían en las dos finas columnas de plasma. En teoría, podríamos recuperar parte de esa energía, pero la tarea no es ni mucho menos sencilla.

Además, y aunque hasta hoy se han hecho grandes progresos en la tecnología necesaria para acelerar electrones con esta técnica, la aceleración de positrones está aún en mantillas. Lo más probable es que haga falta una década de investigación básica para llevar la aceleración de positrones al mismo punto en que hoy se encuentra la de electrones. También se podría hacer que los electrones chocaran con otros electrones, o incluso con protones, de modo que uno o ambos aceleradores de electrones fueran de campo de estela de plasma. Otra idea que los científicos están explorando en el CERN es modular un paquete de protones de muchos centímetros de longitud enviándolo a través de una columna de plasma y usar la estela generada para acelerar un paquete de electrones.

El futuro de los aceleradores basados en plasma es tan incierto como apasionante. Parece factible que dentro de un decenio podamos construir pequeños aceleradores de plasma de 10 GeV para diversas aplicaciones científicas y comerciales, aprovechando los instrumentos que ya existen para generar haces láser y de electrones. Pero ese logro aún nos situaría muy lejos de obtener un colisionador lineal basado en plasma capaz de realizar nuevos descubrimientos en física fundamental. Aunque hemos conseguido espectaculares progresos experimentales, los parámetros de los haces que hemos logrado hasta ahora no bastan para construir un acelerador que opere en la frontera energética actual. Con todo, dadas las inciertas perspectivas del Colisionador Lineal Internacional y el Futuro Colisionador Circular, puede que nuestra mejor opción sea persistir en el perfeccionamiento de una técnica exótica que permitiría reducir tamaños y costes. El desarrollo de la técnica basada en plasma representa un gran reto científico e ingenieril para este siglo, al tiempo que ofrece una magnífica oportunidad para asumir riesgos, ser creativos y resolver problemas fascinantes, así como la tentadora posibilidad de descubrir nuevas piezas fundamentales de la naturaleza. IyC

PARA SABER MÁS

Electron acceleration from the breaking of relativistic plasma waves. A. Modena et al. en *Nature*, vol. 377, págs. 606–608, octubre de 1995.
Energy doubling of 42 GeV electrons in a metre-scale plasma wakefield accelerator. Ian Blumenfeld et al. en *Nature*, vol. 445, págs. 741–744, febrero de 2007.
Acceleration of electrons in the plasma wakefield of a proton bunch. E. Adli et al. en *Nature*, vol. 561, págs. 363–367, agosto de 2018.
2020 roadmap on plasma accelerators. Félicie Albert et al. en *New Journal of Physics*, vol. 23, art. 031101, marzo de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

Aceleradores de partículas mediante plasma. John M. Dawson en *IyC*, mayo de 1989.
Aceleradores de plasma. Chandrashekhar Joshi en *IyC*, abril de 2006.
El acelerador que podría salvar la física. Howard Baer, Vernon D. Barger y Jenny List en *IyC*, agosto de 2016.

por Leslie Nemo

Si eres investigador en el campo de las ciencias de la vida y la naturaleza, y tienes buenas fotografías que ilustren algún fenómeno de interés, te invitamos a participar en esta sección. Más información en **www.investigacionyciencia.es/decerca**

El primer libro de fotografías de botánica

La naturalista del siglo xix Anna Atkins recolectaba algas y tomaba fotografías de los especímenes con la entonces técnica puntera de la cianotipia

Nacida en Inglaterra en 1799, Anna Atkins era aficionada a la botánica, un pasatiempo que la sociedad británica contemporánea consideraba apropiado para una dama. Recogió y dibujó a mano cientos de algas que halló en sus excursiones por las costas de toda Gran Bretaña. Pero, como la propia Atkins explicó a un amigo, algunos especímenes eran tan pequeños y prolijos en detalles que no tuvo más opción que probar con otra técnica de documentación, novedosa en aquella época.

A mediados de la década de 1840, el astrónomo y químico inglés John Herschel inició a Atkins en su nuevo método de fotografía. Cuando extendía sales de hierro sobre una hoja de papel y la dejaba expuesta al sol, la luz volvía azul el papel, salvo la parte cubierta por cualquier objeto que hubiese depositado encima. Herschel llamó a la técnica cianotipia.

Atkins aplicó el método a sus especímenes de algas, alisándolos con cuidado, pues se volvían muy frágiles al sacarlos fuera del agua, de modo que la combinación de los reactivos químicos con la luz solar dejó una impresión duradera de sus colecciones en las páginas. Esta botánica pionera recopiló sus cianotipos de algas en tres volúmenes titulados *Photographs of British algae: Cyanotype impressions*, de los que solo se conoce una docena de copias. El primer volumen, que vio la luz en octubre de 1843, se considera el primer libro de fotografías jamás publicado.

—Leslie Nemo es periodista científica especializada en salud y medioambiente.

1



COLECCIÓN SPENCER, BIBLIOTECA PÚBLICA DE NUEVA YORK

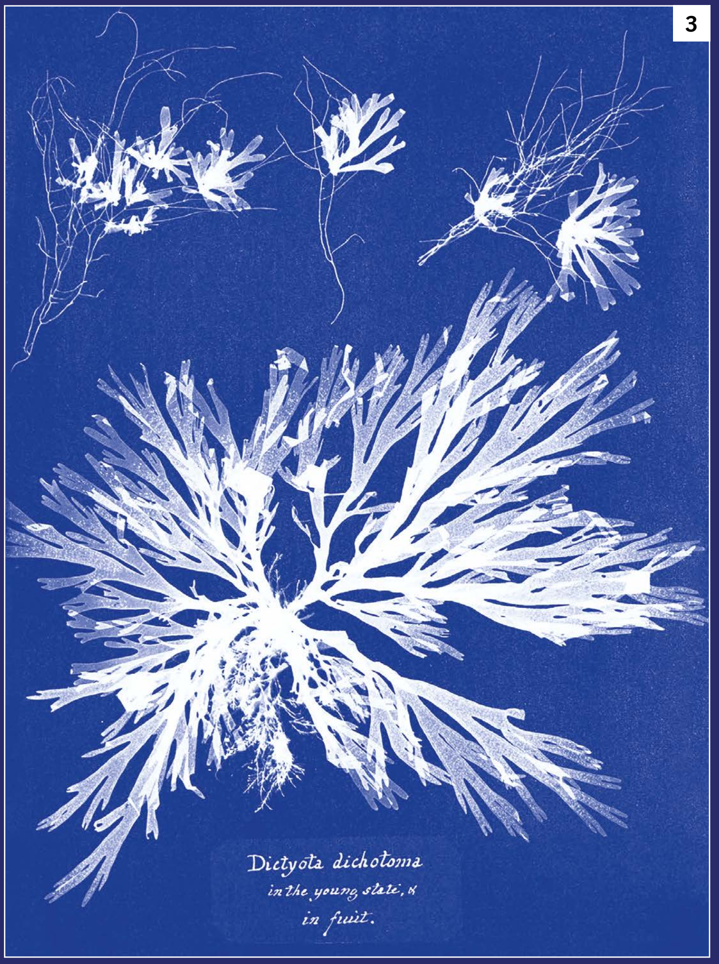
1 *CHORDARIA FLAGELLIFORMIS*. Como tantas otras algas pardas o feofíceas, esta especie contiene fucoidanos, azúcares que se estudian desde hace tiempo como posibles reguladores del sistema inmunitario o como anticoagulantes.

2 *CYSTOSEIRA GRANULATA*. Esta especie y otras emparentadas con ella brotan en densos bosques submarinos a lo largo de la costa. Hoy no es tan abundante como en los días en que Atkins recogió este ejemplar. Los biólogos sospechan que la contaminación de las aguas, la eutrofización por el exceso de nutrientes y su turbidez creciente están acabando con este género de algas marinas.

3 *DICTYOTA DICHOTOMA* en estado juvenil y maduro. Se ha demostrado que las especies de *Dictyota*, un género de feofíceas, podrían emplearse como aditivo alimentario para reducir el metano (gas de efecto invernadero) que las vacas liberan con las flatulencias y los eructos.

4 *ALARIA ESCULENTA*. Este fragmento en forma de cinta pertenece a una especie muy apreciada por los cultivadores de algas del estado de Maine, donde fue una de las tres primeras especies cultivadas a escala comercial en EE.UU.







por Jon Umerez

Jon Umerez es investigador titular en el Departamento de Filosofía de la Universidad del País Vasco.



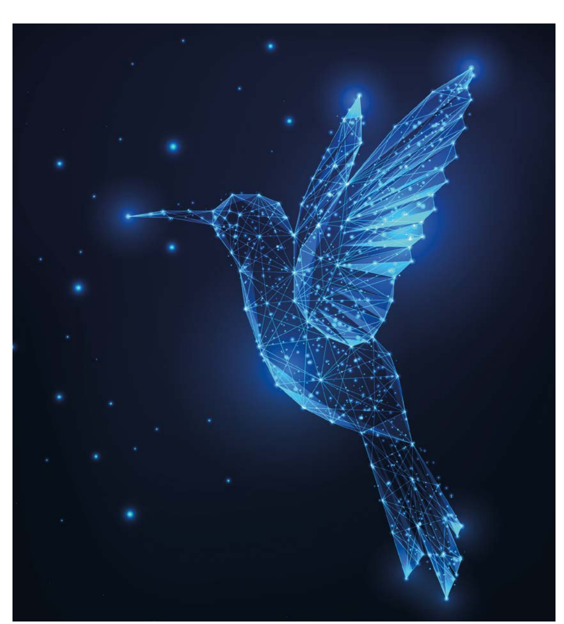
Los signos y el significado en la naturaleza

Una disciplina joven, la biosemiótica, investiga el entrelazamiento de los signos y la vida a todos los niveles

Nos resulta habitual hablar en términos semióticos o lingüísticos (relativos a la codificación) de los aspectos más centrales de la biología. Por ejemplo, en genética molecular están asentadas voces como *código genético*, *información genética*, *copia* o *traducción*. Es también normal usar términos semióticos (relativos a los signos y la comunicación) para las actividades de especies no humanas, como *señales*, *avisos* o *llamadas*. Y, del mismo modo, también se ha establecido el uso de términos semióticos para denominar procesos biomoleculares más allá de los genéticos. Así, en neurología o inmunología son corrientes palabras como *señal*, *reconocimiento* o *comunicación*.

A primera vista podría parecer que la biología y la semiótica tienen poco que ver entre sí. No en vano, las clasificamos en campos de conocimiento separados, asignándolas respectivamente a las ciencias naturales y a las humanas. De hecho, en biología no se suelen asumir por completo las implicaciones de la terminología semiótica empleada. Y a la inversa, en semiótica o semiología la cuestión de la procedencia o de la constitución biológica del lenguaje ha sido incluso vista con suspicacia, en tanto que intento no solicitado de naturalización. Pues bien, la biosemiótica, entendida como una «agenda de investigación interdisciplinar», busca precisamente explicitar y asumir por completo esa conexión entre biología y semiótica.

Es cierto que, por un lado, en filosofía de la biología y en las áreas más teóricas de la biología se discute hasta qué punto es satisfactorio sostener que el uso de la terminología lingüístico-informacional sea meramente metafórico. Para algunos autores, ha de encuadrarse en el marco de la teoría de la comunicación shannoniana. Para otros, llanamente, se trata de un vocabulario inadecuado que deberíamos sustituir poco a poco. Pero también hay quien, como Maynard Smith, apuesta por dar cuenta del componente semántico o intencional de forma naturalizada apelando, por ejemplo, a la selección natural.



GETTY IMAGES/INKOLY/ISTOCK

Por otro lado, las investigaciones sobre la comunicación no humana, entendida en forma de sistemas de signos, reciben cada vez más atención en las ciencias del comportamiento animal. Asimismo, las consideraciones biológicas, evolutivas y fisiológicas se van abriendo camino en los estudios semióticos sobre el lenguaje, que abordan ya sus orígenes, vías de evolución y desarrollo, así como sus condicionantes orgánicos y ambientales. Empieza a ser habitual encontrar corrientes, tanto en las ciencias biológicas como en las ciencias de la comunicación y de los signos, que cruzan los límites disciplinares. Sin embargo, la biosemiótica pretende ir mucho más allá, pues aspira a transformar radicalmente los dos ámbitos disciplinares que conecta.

Donald Favareau, lingüista de la Universidad Nacional de Singapur, define la biosemiótica, apelando a la etimología, como «el estudio del procesamiento de signos tanto en el interior de los sistemas vivos como entre ellos». La Sociedad Internacional de Estudios Biosemióticos (ISBS) afirma, con algo más de detalle, que la biosemiótica es «una agenda de investigación interdisciplinar que investiga las innumerables formas de comunicación y significación que se encuentran en y entre los sistemas vivos. Por tanto, es el estudio de la representación, el significado, el sentido y la relevancia biológica de los códigos y procesos de signos, desde las secuencias del código genético hasta los procesos de señalización intercelular, el comportamiento de exhibición animal y los artefactos semióticos humanos, como el lenguaje y el pensamiento simbólico abstracto».

Esta caracterización estaba ya prefigurada en un texto de 1992 del biólogo danés Claus Emmeche: «La biosemiótica propiamente dicha se ocupa de los procesos de signos en la naturaleza en todas las dimensiones, incluida (1) la emergencia de la semiosis en la naturaleza, que puede coincidir con la aparición de células vivas o anticiparla; (2) la historia natural de los signos; (3) los aspectos «horizontales» de la semiosis en la ontogenia de los organismos, en la comunicación vegetal y animal, y en las funciones de signos

internas en los sistemas inmunológico y nervioso; y (4) la semiótica de la cognición y el lenguaje».

Para calibrar la ambición de la biosemiótica nos puede servir un artículo colectivo y programático publicado en 2009, en el cual destacan dos tesis: la primera establece que «la distinción semiótico/no-semiótico es coextensiva con la distinción vida/no-vida»; y la segunda, que «la biología es incompleta como ciencia en ausencia de una fundamentación semántica explícita».

Para completar este apartado definitorio, mencionemos lo que Marcello Barbieri, biólogo de la Universidad de Ferrara, considera que son los dos postulados básicos que constituyen un mínimo común de la biosemiótica y que funcionan como línea de demarcación frente a otras perspectivas: la idea de que la semiosis es exclusiva de la vida (es decir, de que no existe en la materia inanimada), y la idea de que tanto semiosis como significado son entidades naturales.

A partir de estas líneas definitorias, con el tiempo han ido apareciendo una gran cantidad de investigaciones históricas y revisiones exhaustivas del campo. Hay cierto consenso generalizado en identificar dos enfoques principales que, a principios de los años noventa, cristalizaron y comenzaron a acercarse con cierta presencia, sobre todo en el marco de la semiótica y, algo menos, en el de la biología. Tales enfoques convergieron a inicios de este siglo y se corresponden con la distinción que hace el biólogo danés Jasper Hoffmeyer. Por un lado está la *endosemiosis*, la cual se refiere a los procesos que implican signos dentro del organismo; es decir, a nivel fisiológico y bioquímico. Por otro tenemos la *exosemiosis*, relativa a los procesos que emplean signos y tienen lugar entre organismos, lo que abarcaría la etología y la ecología. En el fondo, esta distinción se mantiene en la clasificación que hace Barbieri atendiendo a los orígenes de cada enfoque: «biosemiótica basada en el código», que nace del descubrimiento del código genético, y «biosemiótica basada en signos», que surge de la apreciación de que el ser humano no es el único animal semiótico.

La primera tendencia está representada por el propio Barbieri y su trabajo en lo que denomina «biología de códigos», en la que suele incluir diversos precursores que, desde el mismo momento de su descubrimiento, explicitan la conexión entre el código genético y el lenguaje. Pero, probablemente, el impulso más determinante proviene de la segunda tendencia, que se asienta en el trabajo del lingüista húngaro Thomas Sebeok para expandir la semiótica más allá de la especie humana. Sebeok cuestionó que el uso de signos fuese algo privativo de los humanos y sostuvo que la comunicación animal también se basa en ellos. Fue quien propuso el término *zoosemiosis*, que más tarde sustituiría por el más ambicioso y abarcador de *biosemiótica*. En los años noventa del siglo pasado, las ideas de Sebeok, junto con la biología teórica de Hoffmeyer, ambos influenciados por la obra de Jakob von Uexküll, fueron dando cuerpo al nuevo programa de investigación biosemiótico.

La convergencia definitiva se produjo en el marco del Cuarto Encuentro Anual sobre Biosemiótica, celebrado en Praga en julio de 2004. Fue allí donde se acordó el término *biosemiótica* para denominar de manera unificada este campo de investigación, al tiempo que se abandonaron otras designaciones. Este foco se fue consolidando hasta adquirir, en pocos años, algunos de los atributos característicos de un campo establecido. Los estudios de a ciencia, en sentido amplio, nos han enseñado a identificar, además de los aspectos temáticos, también los elementos institucionales que son constitutivos de una disciplina científica. En lo que respecta a la biosemiótica, podemos encontrar sin mucho esfuerzo buena parte de ellos: una comunidad investigadora, grupos y centros de investigación reconocidos, una conferencia periódica específica, una sociedad internacional propia, una revista especializada y una colección temática de libros. Y, aunque son más exiguos, también existen elementos relativos a la organización y la formación académicas: departamentos o laboratorios universitarios y programas de grado o posgrado.

Tras haber organizado a lo largo de los años noventa diversos simposios con temáticas particulares afines y numerosas sesiones específicas en congresos más amplios, la primera conferencia internacional de biosemiótica se celebró en Copenhague en mayo de 2001, y se ha seguido celebrando ininterrumpidamente desde entonces. La vigesimoprimera edición se celebró el pasado mes de julio, en un formato híbrido con una parte presencial en Estocolmo.

Fruto de esas reuniones, la ISBS fue fundada en 2005. También ese año, tras haber promovido en los años precedentes varios números monográficos en revistas como *Semiotica* o *Sign Systems Studies*, se puso en marcha una revista especializada, *Journal of Biosemiotics*, de la que se publicaron dos números, aunque no llegó a consolidarse. Un segundo intento de revista, titulado simplemente *Biosemiotics*, lanzó su primer número en abril de 2008, y hoy sigue activa publicada por Springer. Marcello Barbieri fue su primer editor. Asimismo, existe una colección de libros, editada también por Springer, que incluye monografías, volúmenes colectivos y compilaciones. El nombre de la colección es *Biosemiotics*, y desde 2008 ha publicado veinte títulos.

Así pues, teniendo en cuenta, por un lado, la especificidad de su objeto de estudio, la delimitación y clarificación de su ámbito temático, sus hipótesis básicas y sus propuestas como programa de investigación, y, por otro, los rasgos disciplinarios que exhibe, podemos concluir que la biosemiótica ha superado ya el estadio de lo que Emmeche denominó «red de investigación transdisciplinar» y se encamina a asentar su posición como programa de investigación autónomo. Programa, por lo demás, extremadamente ambicioso, pues aborda sin ambages la cuestión del origen y la evolución natural de los signos y del significado, así como la comprensión integral de sus rasgos característicos a todos los niveles biológicos y humanos.

PARA SABER MÁS

Modeling life: A note on the semiotics of emergence and computation in artificial and natural living systems. Claus Emmeche en *The semiotic web 1991: Biosemiotics*, dirigido por Thomas A. Sebeok y Jean Umiker-Sebeok. De Gruyter Mouton, 1992.

The concept of information in biology. John Maynard Smith en *Philosophy of Science*, vol. 67, págs. 177-194, junio de 2000.

What is biosemiotics? Marcello Barbieri en *Biosemiotics*, vol. 1, págs 1-3, abril de 2008.

Theses on biosemiotics: Prolegomena to a theoretical biology. Kalevi Kull et al. en *Biological Theory*, vol. 4, págs. 167-173, junio de 2009.

A short history of biosemiotics. Marcello Barbieri en *Biosemiotics*, vol. 2, págs. 221-245, julio de 2009.

EN NUESTRO ARCHIVO

El enfoque biológico del lenguaje. Ángel Alonso-Cortés en «El lenguaje humano», colección *Temas* de *IyC*, n.º 5, 1996.

Metáforas de la vida y vida de las metáforas. Alfredo Marcos en *IyC*, julio de 2012.

Hacia una teoría universal. Jérôme Segal en *IyC*, junio de 2013.

por Naomi Oreskes

Naomi Oreskes es profesora de historia de la ciencia en la Universidad Harvard.



¿Debe ser neutral la ciencia?

Los científicos deben admitir que tienen valores para recuperar la confianza social

En los esfuerzos por recuperar la confianza de la sociedad en la ciencia, abandonada en diversos ámbitos en los últimos años, la comunidad científica puede verse tentada a reafirmar su neutralidad. Con frecuencia he escuchado defender a mis colegas que, si la gente ha de volver a creer en nosotros, hemos de procurar que nuestros valores no interfieran en la labor científica. Esto presupone que la neutralidad valorativa es necesaria para ganar la confianza del público, y que es posible alcanzarla. Pero las pruebas disponibles indican que ninguna de esas dos suposiciones es correcta.

La investigación reciente en materia de comunicación ha demostrado que las personas tienen más probabilidades de aceptar un mensaje cuando este es emitido por mensajeros de confianza, como profesores, líderes religiosos o empresariales, o médicos y enfermeras locales. Una estrategia para que los científicos consigan esa confianza es establecer vínculos desde sus laboratorios, institutos y departamentos académicos con las comunidades en las que viven y trabajan. Una forma de hacerlo es asociarse con organizaciones como el Centro Nacional para la Educación en Ciencias de EE.UU., fundado para luchar contra el creacionismo en las aulas pero que ahora trabaja con los profesores para aumentar la comprensión de la naturaleza de la ciencia. Para hacerlo, los científicos no precisan desprenderse de sus valores personales; simplemente necesitan compartir con los profesores su creencia en el valor de la educación. Se trata de una cuestión importante, porque las investigaciones indican que, aunque lo intentemos, no podemos desprendernos de nuestros valores.

Es bien sabido que las personas son más propensas a aceptar las pruebas que concuerdan con lo que ya creen. Los psicólogos lo llaman «razonamiento motivado» y, aunque el término es relativamente reciente, la idea que representa no. Hace cuatrocientos años, Francis Bacon lo expresó de la siguiente forma: «El entendimiento humano no es puro, sino que se ve influido por su voluntad y sus emociones [...] el hombre prefiere creer aquello que desea que sea cierto».

Los científicos tal vez supongan que el razonamiento motivado explica las posiciones erróneas —por ejemplo, el rechazo a ponerse mascarilla para limitar la propagación de la COVID-19— pero tiene pocas repercusiones en la ciencia. Desgraciadamente, hay pocas pruebas que respalden esa suposición. Algunas investigaciones muestran que, incluso con incentivos económicos, la mayoría de las personas son incapaces de deshacerse de sus sesgos. Por lo tanto, el problema parece que no es una cuestión de voluntad, sino de capacidad. Los grandes científicos quizá piensen que, al estar entrenados para ser objetivos, evitan los obstáculos en los que caen las personas corrientes. Pero ese no es necesariamente el caso.



¿Significa esto que la ciencia no puede ser objetiva? Desde luego que sí. Para ello, los científicos no solo deben vigilar sus propios sesgos, sino los mecanismos utilizados para asegurarse de que los sesgos se minimizan. De todos ellos, el mejor conocido es la revisión externa de los artículos científicos, aunque igual o más importante es la diversidad. Tal como explico en mi libro *Why trust science*, la diversidad en la ciencia no solo es fundamental para asegurarnos de que todas las personas tienen una oportunidad para desarrollar su talento, sino también para cerciorarnos de que la ciencia es tan imparcial como sea posible.

Algunos argumentarán que deberíamos esforzarnos en lograr la neutralidad valorativa, incluso aunque sepamos que no lo podemos conseguir por completo. En la práctica de la ciencia, este argumento puede ser válido. Pero lo que resulta útil en la investigación científica puede ser contraproducente en la comunicación pública, porque la idea de un mensajero de confianza implica que se compartan los valores. Los estudios muestran que los científicos estadounidenses quieren (entre otras cosas) utilizar su conocimiento para mejorar la salud, hacer que la vida sea más fácil, fortalecer la economía a través de la innovación y los descubrimientos y proteger a las personas de las pérdidas derivadas del cambio climático.

Las encuestas de opinión sugieren que la mayoría de estadounidenses también desean muchas de estas cosas; el 73 por ciento cree que la ciencia tiene un impacto principalmente positivo sobre la sociedad. Si los científicos se niegan a hablar de sus valores por miedo a que estos difieran de los del público al que se dirigen, pueden perder la oportunidad de descubrir que existen importantes puntos en los que coinciden. Si, por otro lado, los científicos insisten en su neutralidad valorativa, tal vez sean considerados falsos, si no deshonestos. Una persona que verdaderamente no tiene valores —o rechaza permitirse que los valores influyan en su toma de decisiones— ¡sería un sociópata!

La neutralidad valorativa es como un casco de aluminio. En lugar de intentar esconderse tras él, los científicos deberían admitir que tienen valores y estar orgullosos de que estos motiven la investigación orientada a hacer del mundo un lugar mejor para todos.

ILUSTRACIÓN DE JAY BENDT

por José Manuel López Nicolás

José Manuel López Nicolás, catedrático de bioquímica y biología molecular en la Universidad de Murcia, investiga y escribe sobre nutrición y tecnología de los alimentos.



Renovar los alimentos funcionales

Ingredientes como las ciclodextrinas podrían ofrecerles un nuevo impulso

Los alimentos funcionales, aquellos a los que se les ha añadido, eliminado o sustituido algún ingrediente para que ejerzan un efecto beneficioso sobre la salud, experimentaron un rápido auge desde su aparición hace unas décadas. Sin embargo, la burbuja está comenzando a desinflarse. La gran mayoría de las empresas emplean el mismo tipo de compuestos para enriquecerlos o mejorarlos, por lo que el mercado está sobresaturado de productos casi idénticos.

La escasa diversidad de los ingredientes bioactivos que se añaden ha provocado que muchas marcas comercialicen el mismo tipo de alimentos funcionales, como los yogures con bífidus, las leches enriquecidas en omega-3, los zumos suplementados con vitaminas o las margarinas con esteroles. Además, muchas de las propiedades saludables publicitadas durante años sobre estos compuestos no han sido respaldadas por la ciencia. Por este motivo, la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) ha desestimado un gran número de ingredientes supuestamente beneficiosos, entre ellos la taurina, la carnitina, las isoflavonas y muchas especies de lactobacilos.

Para superar esos obstáculos, la industria alimentaria se ha lanzado a buscar nuevas sustancias que permitan desarrollar alimentos funcionales innovadores. En particular, se incide en cuatro objetivos básicos: diversificar el mercado, mejorar los procesos de elaboración, acentuar el perfil sensorial y poseer propiedades saludables avaladas por la EFSA.

Hallar la molécula perfecta no resulta fácil. Pero el desarrollo en los últimos años de una nueva técnica de elaboración de alimentos puede allanar el camino. Es la encapsulación molecular, con la que se introduce una molécula huésped dentro de un agente encapsulante.

Uno de los agentes que destaca por su enorme potencial en impulsar los alimentos funcionales son las ciclodextrinas. Se trata de oligosacáridos cíclicos constituidos por entre seis y ocho unidades de glucosa. Estructuralmente, tienen forma de anillo troncocónico con un interior altamente apolar y un exterior polar, lo que les confiere la capacidad de encapsular una amplia variedad de moléculas hidrofóbicas. Detallo a continuación las seis ventajas más importantes que ofrecen las ciclodextrinas a los alimentos.

En primer lugar, permiten encapsular y «solubilizar» moléculas apolares poco explotadas comercialmente, como los estilbenos o las betalainas hidrofóbicas, que luego pueden incorporarse a los alimentos para enriquecerlos. La mayoría de los ingredientes de los alimentos funcionales tradicionales, en cambio, no presentan dicha capacidad porque son de naturaleza polar.



GETTY IMAGES/IULIIA ZAVALISHINA/ISTOCK, MODIFICADO POR INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Por otro lado, las ciclodextrinas no solo pueden servir para enriquecer los alimentos. Recientemente, se han utilizado para disminuir, e incluso eliminar, sustancias apolares perjudiciales para la salud, como el colesterol presente en varios tipos de mantequillas, cremas o helados. Dicha aplicación da lugar a alimentos «bajos en colesterol».

Además, la encapsulación protege a las sustancias interiores frente a la luz, el oxígeno, la temperatura, la radiación u otros factores que puedan degradarlas. Las ciclodextrinas pueden, así, incorporar numerosas moléculas con propiedades saludables que no suelen utilizarse en la industria de los productos funcionales por su gran inestabilidad.

Si hay una propiedad que caracteriza a las ciclodextrinas, es su capacidad de liberar lentamente las sustancias encapsuladas. Al no formar cápsulas cerradas, los compuestos son liberados poco a poco al exterior, lo que prolonga su efecto en el tiempo. Esto mejora su biodisponibilidad, uno de los grandes inconvenientes que presentan los alimentos funcionales a la hora de recibir el beneplácito de la EFSA.

Asimismo, las ciclodextrinas no solo mejoran el valor nutritivo de los alimentos funcionales; también acentúan sus propiedades organolépticas, factor clave en el éxito de cualquier producto. Muchos alimentos presentan unas buenas propiedades sensoriales, pero estas suelen desaparecer con rapidez. Pues bien, la encapsulación (y posterior liberación lenta) de numerosas sustancias volátiles permite mantener el aroma y el sabor mucho más tiempo. Además, también sirve para enmascarar sabores y olores desagradables.

Por último, la propiedad más sorprendente de estas moléculas no tiene nada que ver con su poder encapsulante. Gracias a su capacidad para inhibir la enzima amilasa, la EFSA ha autorizado que determinados alimentos publiciten en condiciones muy concretas que «el consumo de alfa-ciclodextrina mitiga el aumento de la glucosa en la sangre tras la ingesta de comidas que contienen almidón», un rasgo importante para la población diabética.

En conclusión, en el ámbito de los alimentos funcionales, la industria debe avanzar y desarrollar productos innovadores y mejorados. Debe renovarse o, de lo contrario, «morirá». El progreso científico y tecnológico ofrece a estos alimentos una segunda oportunidad. Veremos si la aprovechan. IyC

CONTAMINACIÓN

Los riesgos de los microplásticos

MICROPLÁSTICOS recogidos en el río Magothy, Maryland, EE.UU.

¿Cómo afectan a la salud los diminutos plásticos que van a parar a nuestro cuerpo y al de los organismos marinos?

XiaoZhi Lim

XiaoZhi Lim es escritora científica especializada en química, ciencia de materiales y medioambiente.



Dunzhu Li solía calentar cada día en el microondas la comida envasada en recipientes de plástico. Pero esta ingeniera ambiental abandonó ese hábito a raíz de un descubrimiento inquietante que hizo su grupo de investigación: los envases de plástico alimentario desprenden gran cantidad de partículas diminutas en el agua caliente, los llamados microplásticos. «Nos quedamos helados», afirma Li. Los hervidores y los biberones también desprenden microplásticos, según dieron a conocer el pasado octubre ella y otros investigadores del Trinity College de Dublín. Si los padres preparan la leche en polvo con agua caliente agitándola en una botella de plástico, el bebé puede llegar a ingerir más de un millón de partículas de microplástico cada día, calculó el equipo.

Lo que Li y otros investigadores no saben todavía es si eso supone un peligro. Todos inhalamos polvo y arena, pero no está claro que la ingesta de pedacitos de plástico resulte perjudicial. «La mayor parte de lo que ingerimos recorre el tubo digestivo entero y sale intacto», afirma Tamara Galloway, ecotoxicóloga en la Universidad de Exeter. Pero «creo que es acertado decir que el riesgo podría ser alto», declara Li, eligiendo sus palabras con prudencia.

A los investigadores les preocupa desde hace casi una veintena de años los daños que podrían causar los microplásticos, aunque el grueso de los estudios se ha centrado en el riesgo para la fauna marina. Richard Thompson, ecólogo marino en la Universidad de Plymouth, acuñó el término en 2004 para describir las partículas de plástico inferiores a 5 milímetros, después de que su equipo confirmase su presencia en las playas del Reino Unido. Desde entonces se han hallado en todos los lugares donde se han buscado: en las profundidades marinas, en la nieve ártica y en el hielo antártico; en el marisco, en la sal de mesa, en el agua potable y la cerveza; suspendidas en el aire o arrastradas por la lluvia sobre las montañas y las ciudades. Esos minúsculos fragmentos pueden tardar décadas o siglos en degradarse por completo. «Es casi seguro que la práctica totalidad de las especies están expuestas a ellos en mayor o menor grado», asegura Galloway.

Las investigaciones pioneras sobre los microplásticos se centraron en las microperlas contenidas en los productos de cuidado personal y en el granulado plástico sin procesar que se vierte antes de que sea moldeado en objetos, así como en los fragmentos que se desprenden lentamente de las botellas desechadas y de otros residuos de gran tamaño. Todos acaban arrastrados por el agua hacia los ríos y el mar: en 2015, los oceanógrafos calcularon que había entre 15 y 51 billones de partículas de microplástico flotando en la superficie de los mares del planeta. Desde entonces se han descubierto otras fuentes de microplástico: las briznas arrancadas de los neumáticos por el asfalto y las microfibras sintéticas que se desprenden de la ropa, por citar algunas. Las partículas son arrastradas por el viento que circula entre el mar y la tierra, así que acabamos inhalando o ingiriendo plástico de cualquier fuente.

A partir de pequeños estudios sobre el contenido de microplásticos en el aire, el agua, la sal y el marisco, Albert Koelmans, ambientólogo de la Universidad de Wageningen, ha calculado

EN SÍNTESIS

Desde que se acuñó el término «microplásticos» en 2004, estos se han hallado en un sinfín de lugares, desde el mar y el hielo polar hasta los alimentos que ingerimos y el aire que respiramos.

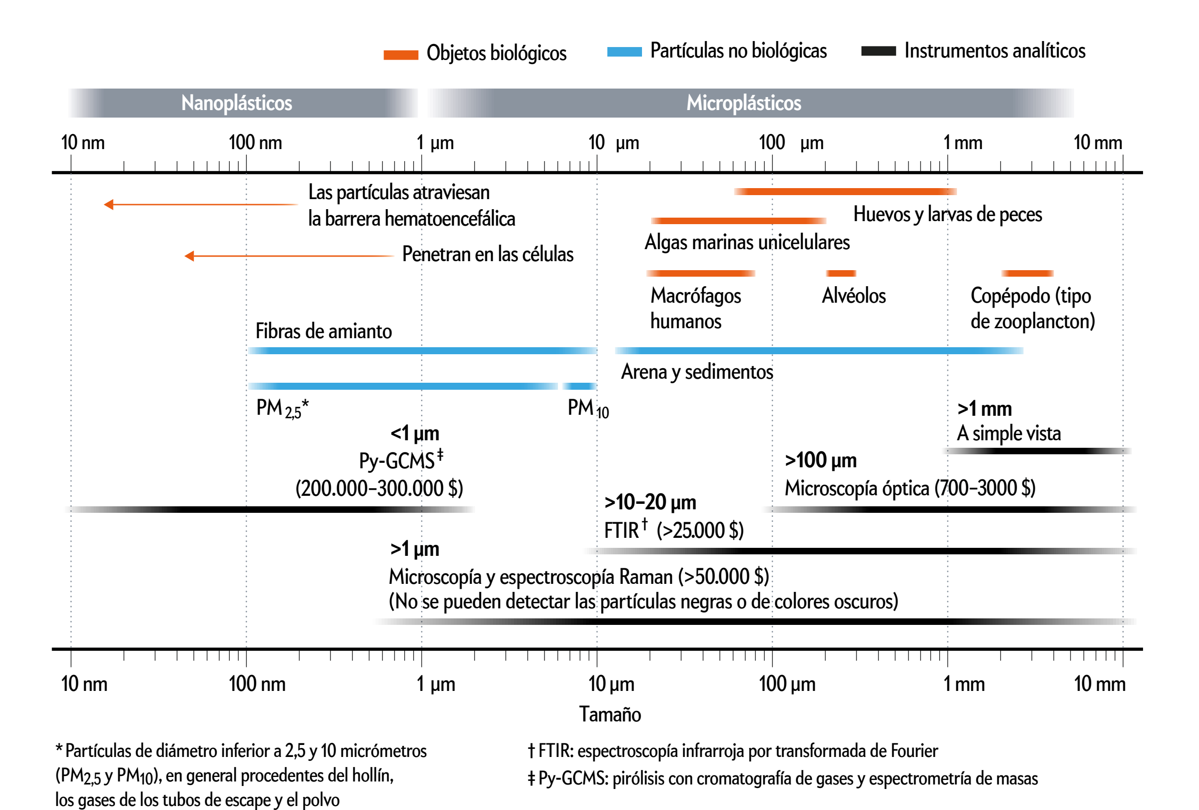
Puesto que tardan décadas o siglos en degradarse, preocupa su acumulación en el ambiente y en nuestro organismo, en especial las partículas menores de un micrómetro, capaces de penetrar en las células.

Evaluar los daños de los microplásticos reviste una enorme dificultad. La mayoría de los estudios se han centrado en la fauna marina, en la que se ha observado un menor crecimiento y capacidad reproductiva. En los humanos, su efecto tóxico se ha demostrado en tejidos y células cultivados en el laboratorio.

PÁGINAS ANTERIORES: 5GYRES, CORTESÍA DE LA UNIVERSIDAD DE OREGÓN

La escala de los microplásticos

Los microplásticos y los nanoplásticos tienen unas dimensiones similares a las de multitud de seres vivos, pero a medida que disminuyen de tamaño resulta cada vez más difícil y caro analizarlos.



que los niños y los adultos podríamos ingerir entre pocas docenas y más de 100.000 pedacitos de ellos cada día, según relataba este marzo. Él y sus colaboradores creen que, en el peor de los casos, una persona estaría ingiriendo la masa equivalente a una tarjeta de crédito al año.

Las autoridades están dando los primeros pasos para cuantificar el riesgo para la salud humana y están calculando nuestra exposición a los microplásticos. La Junta Supervisora de los Recursos Hídricos del Estado de California, una rama de la agencia de protección ambiental de ese estado, se convertirá muy pronto en la primera autoridad reguladora del mundo en anunciar métodos normalizados destinados a medir la concentración de este material en el agua potable. El objetivo es analizar el agua durante los próximos cuatro años y difundir públicamente los resultados.

Evaluar los efectos que los minúsculos pedacitos de plástico ejercen en las personas y los animales es la otra mitad del problema. Es más sencillo de decir que de hacer. En más de cien estudios de laboratorio se han expuesto animales, sobre todo acuáticos, a los microplásticos. Pero los resultados, esto es, el grado en que afectan a la reproducción o causan daños físicos a los organismos, resultan difíciles de interpretar, porque los microplásticos adoptan numerosas formas, tamaños y composiciones, y en muchos estudios se usaron materiales bastante diferentes de los que uno encuentra dispersos en el ambiente.

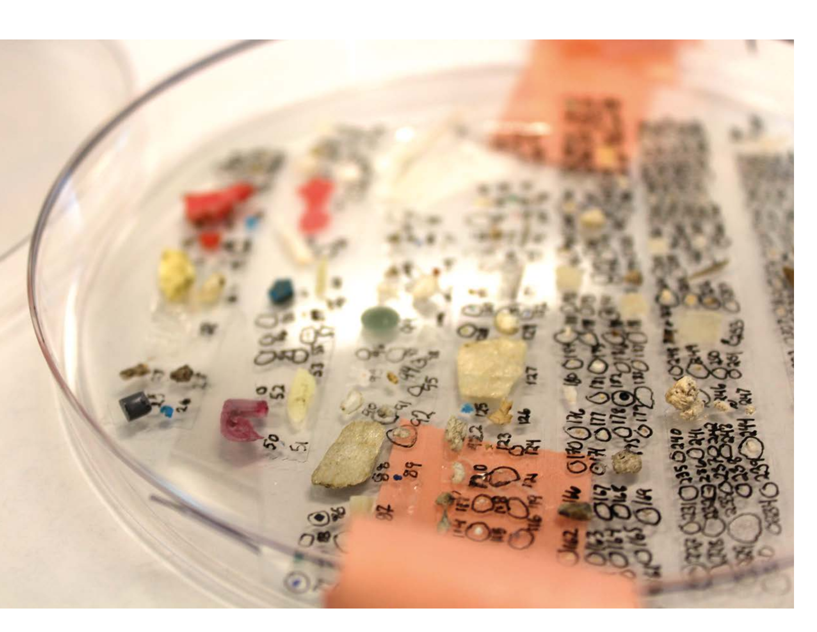
Las partículas que más preocupan a los expertos son las más pequeñas, inferiores a 1 micrómetro, que conforman el nanoplástico. Algunas son capaces de penetrar en las células, donde podrían alterar la actividad interna. Pero la mayoría son demasiado pequeñas para ser visibles; sin ir más lejos, no se contabilizan en los cálculos de la ingesta realizados por Koelmans, y el estado de California no intentará controlarlas.

Una cosa está clara: el problema no cesará de crecer. Cada año se fabrican 400 millones de toneladas de plástico, cantidad que previsiblemente se habrá duplicado con creces en 2050. Aunque por arte de magia mañana se paralizase toda la producción, el plástico acumulado en los vertederos y esparcido por el ambiente, un volumen que se cifra en torno a 5000 millones de toneladas, seguiría desintegrándose en fragmentos minúsculos que son imposibles de recoger y limpiar, lo que elevará de forma incesante los niveles de microplásticos. Koelmans lo califica como una «bomba de plástico con temporizador».

«Cuando me preguntan por los riesgos, contesto que ahora mismo no estoy alarmado, pero me preocupa el futuro si no hacemos nada al respecto», afirma.

PERJUICIOS DIVERSOS

Los investigadores barajan varias teorías sobre los daños que pueden causar los pedacitos de plástico. Si son lo bastante pequeños para penetrar en las células y los tejidos, podrían tener



MICROPLÁSTICOS recogidos en la bahía de San Francisco, marcados para su estudio.

efectos irritantes por el mero hecho de ser cuerpos extraños, como sucede con las finísimas fibras de amianto, que inflaman el tejido pulmonar y acaban provocando cáncer. Existe un potencial paralelo con la contaminación atmosférica: se sabe que las partículas de hollín que emiten las centrales generadoras de electricidad, el humo del tráfico y los incendios forestales, denominadas PM_{10} y $PM_{2,5}$ (materia particulada de 10 y 2,5 micrómetros de diámetro, respectivamente), se depositan en las vías aéreas y en los pulmones. Allí, en concentraciones elevadas dañan el aparato respiratorio. Aun así, los niveles de PM_{10} son miles de veces mayores que las concentraciones de microplásticos que se han detectado en el aire, destaca Koelmans.

Es más probable que, de confirmarse los efectos perjudiciales de los microplásticos, estos obedezcan a la toxicidad química. Los fabricantes de plástico incorporan plastificantes, estabilizantes y pigmentos, sustancias peligrosas muchas de ellas que, entre otros efectos, interfieren con el sistema endocrino (hormonal). Pero que la ingesta de los microplásticos aumente sustancialmente nuestra exposición a esos compuestos depende del ritmo con que se desprenden de las partículas de plástico y de la rapidez con que viajan a través del cuerpo, factores que se están comenzando a estudiar en este momento.

Otra idea es que las partículas plásticas dispersas en el ambiente podrían captar contaminantes químicos que luego se liberarían en el cuerpo de los animales que las tragaran. Pero de todos modos los animales incorporan los contaminantes que hay en los alimentos y el agua, e incluso es posible que los microplásticos, si se ingieren en gran medida sin contaminar, ayuden a eliminar contaminantes del intestino. De momento no existe consenso en si las partículas plásticas cargadas de contaminantes son un problema importante, afirma Jennifer Lynch, bióloga marina adscrita al Instituto Nacional de Normas y Tecnología de EE.UU., en Gaithersburg, Maryland.

Quizás el efecto nocivo más simple y directo, por lo menos en lo que concierne a la fauna marina, estribe en que la ingesta de esas partículas sin valor nutritivo les impide tomar el alimento suficiente para vivir. Lynch, que también dirige el Centro de Investigación de la Contaminación Marina en la Universidad del Pacífico de Hawái, en Honolulú, ha practicado la autopsia a tortugas halladas muertas en las playas, en busca de plásticos alojados en el intestino y de sustancias sintéticas en los tejidos. En 2020, su equipo realizó una serie de análisis a 9 crías de tortuga de carey de menos de 3 semanas de vida. En uno de los ejemplares, que medía solo 9 centímetros de largo, se contaron 42 fragmentos plásticos en el tubo digestivo. La mayoría eran microplásticos.

«No creemos que muriesen a causa de los residuos acumulados», asegura Lynch. Pero la experta se plantea que quizá tuvieron problemas para crecer con la rapidez necesaria. «Es una etapa muy dura para estas pequeñas.»

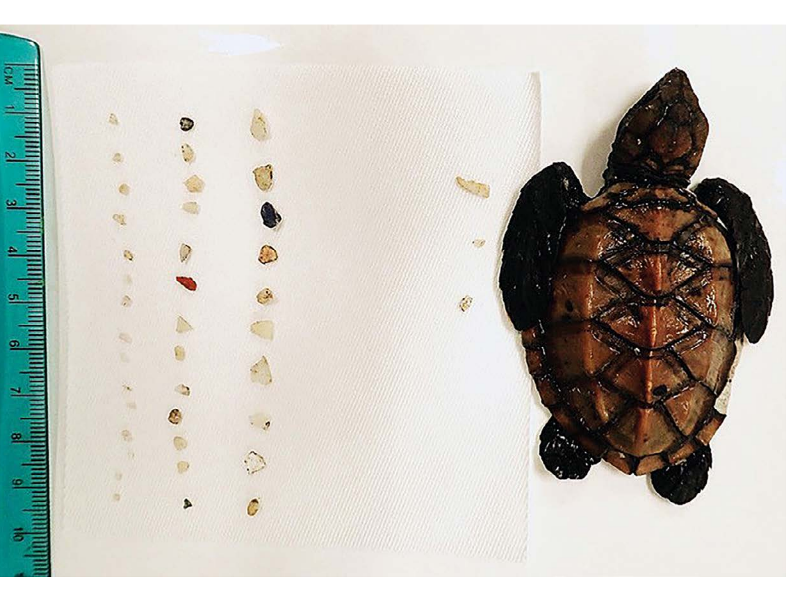
ESTUDIOS DEL MEDIO MARINO

Gran parte de las investigaciones acerca del riesgo que comportan los microplásticos se han centrado en la fauna marina. El zooplancton, del que forman parte algunos de los organismos marinos más diminutos, crece más lentamente y se multiplica menos en su presencia, asegura Penelope Lindeque, del Laboratorio Marino de Plymouth: los huevos son más pequeños y eclosionan menos. Sus experimentos muestran que los problemas de reproducción derivan del hecho de que el zooplancton no se alimenta lo suficiente.

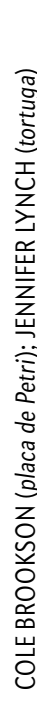
Pero como los ecotoxicólogos iniciaron los experimentos antes de saber qué tipo de microplásticos pululan en los entornos acuáticos, se centraron demasiado en los materiales fabricados; a menudo utilizaban esferas de poliestireno de menor tamaño y en concentraciones mucho mayores que las halladas en el medio natural

Los especialistas han comenzado a simular unas condiciones ambientales más realistas, por lo que ahora usan fibras o fragmentos en lugar de esferas de plástico. Algunos han comenzado a recubrir los materiales experimentales con sustancias que imitan las biopelículas, que al parecer facilitan que los animales ingieran los microplásticos.

Las fibras plantean aparentemente un problema peculiar. Tardan más en transitar por el cuerpo del zooplancton que las esferas, explica Lindeque. En 2017, investigadores australianos demostraron que el zooplancton expuesto a las fibras de micro-



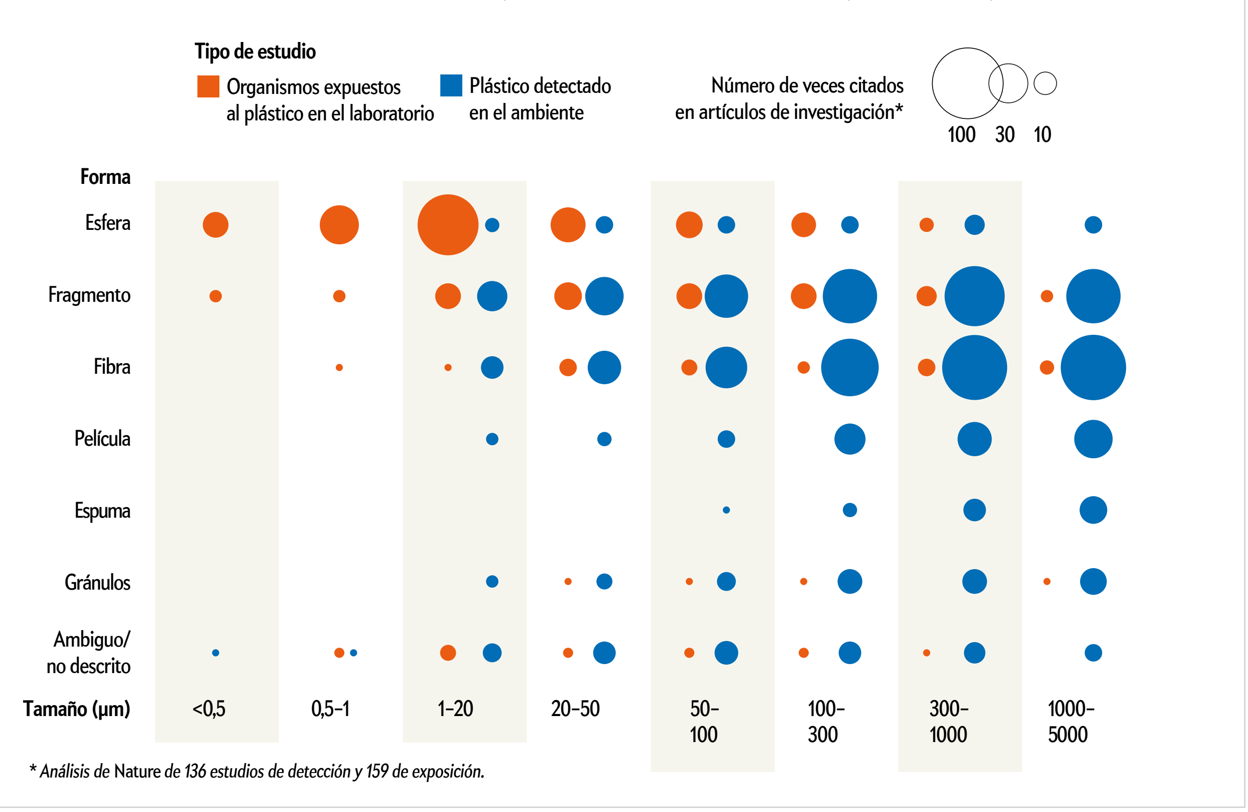
CRÍA DE TORTUGA DE CAREY capturada en Hawái, fotografiada junto a su contenido estomacal de microplásticos.



SESGO CIENTÍFICO

¿Qué microplásticos se investigan más?

Los científicos que estudian en el laboratorio de qué modo afectan los microplásticos a los seres vivos recurren a formas y tamaños que difieren de las partículas detectadas en las prospecciones ambientales. Los pedacitos más minúsculos, o nanoplásticos, que miden menos de 1 micrómetro de diámetro, raramente aparecen en los estudios ambientales por lo difíciles que son de detectar.



* Análisis de Nature de 136 estudios de detección y 159 de exposición.

plástico producía la mitad de las larvas habituales y que, cuando alcanzaban la fase adulta, tenían un menor tamaño. Las fibras no se ingirieron, pero comprobaron que interferían con la natación, y detectaron deformaciones corporales. Otro estudio publicado en 2019 relataba que los cangrejos topo del Pacífico (*Emerita analoga*) expuestos a las fibras vivían menos.

En la mayoría de los experimentos de laboratorio se expone los organismos a un solo tipo de microplástico, de dimensiones, composición y forma concretas. En cambio, Koelmans afirma que en el medio natural están en contacto con mezclas de ellos. En 2019, él y su doctoranda Merel Kooi representaron gráficamente la abundancia de microplásticos registrada en 11 estudios donde se muestrearon aguas marinas, fluviales y sedimentos, para elaborar modelos de mezclas en ambientes acuáticos.

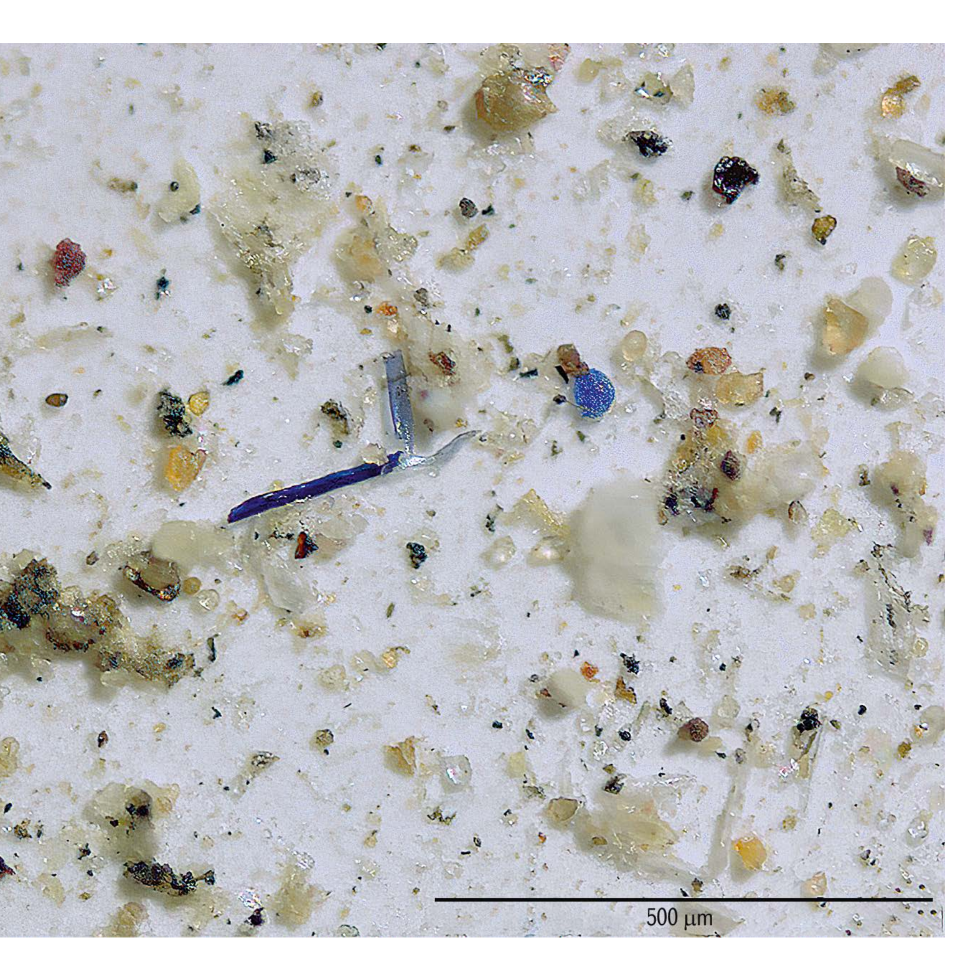
El año pasado, los dos se aliaron con otros colegas para usar este modelo en simulaciones informáticas destinadas a predecir con qué frecuencia se topa el pescado con microplásticos lo bastante pequeños para ingerirlos, así como la probabilidad de que coman la cantidad suficiente para afectar al crecimiento. Calcularon que, con las concentraciones actuales de microplástico contaminantes, los peces corren ese riesgo en el 1,5 por ciento de los lugares donde se han buscado microplásticos. Pero es probable que haya puntos críticos donde ese riesgo sea muy superior, advierte Koelmans. Una posibilidad son las grandes profundidades marinas, porque una vez allí suelen quedar enterrados en los sedimentos, así que es improbable que migren a otros lugares y no hay modo de eliminarlos.

Los mares ya soportan muchos otros factores estresantes, por lo que Lindeque teme que los microplásticos contribuyan a mermar aún más la abundancia de zooplancton y que asciendan por los eslabones de la cadena trófica hasta llegar al ser humano. «Si dañamos el zooplancton, que constituye la base de la cadena trófica marina, debería preocuparnos seriamente el impacto en las poblaciones de peces y su capacidad para alimentar a la población mundial.»

ESTUDIOS EN HUMANOS

Todavía no se ha publicado ningún estudio donde se haya examinado directamente los efectos de los diminutos fragmentos plásticos en el cuerpo humano, aseguran varios expertos destacados en el campo. Solo existen trabajos basados en experimentos de laboratorio en los que se observa la reacción de células o tejidos humanos, o bien de animales, como ratones o ratas, al ser expuestos a los microplásticos. En uno de los estudios, los ratones que comieron grandes cantidades de este material mostraron inflamación en el intestino delgado. En otro, los roedores presentaron menos espermatozoides, y aún en otro, produjeron camadas y crías más pequeñas, en comparación con los grupos de referencia. Algunos ensayos in vitro

FUENTE: NATURE ANALYSIS



POLVO, SEDIMENTO Y MICROPLÁSTICOS en forma de fibras y bolitas se entremezclan en esta imagen ampliada de partículas muestreadas en parques nacionales y áreas silvestres del oeste de Estados Unidos.

JANICE BRAHNEY, UNIVERSIDAD ESTATAL DE UTAH

con células y tejidos humanos también han revelado su efecto tóxico. Pero, al igual que ocurre en los estudios con organismos marinos, no está claro que las concentraciones utilizadas sean representativas de aquellas a las que estamos expuestos los ratones y las personas. En la mayoría de los estudios se usaron perlas de poliestireno, que no reproducen la diversidad de microplásticos que la gente ingiere. Koelmans matiza también que esos trabajos son los primeros que analizan la cuestión y podrían acabar siendo atípicos una vez que se disponga de un volumen de datos consolidado. Hay más estudios in vitro que con animales, pero los investigadores afirman que aún no saben cómo extrapolar los efectos de los microplásticos en los tejidos a los posibles problemas de salud en los animales.

Otra incógnita en cuanto al riesgo es si estos materiales pueden permanecer en el cuerpo humano y acumularse en algunos tejidos. En los estudios con ratones se ha comprobado que los fragmentos de 5 micrómetros pueden quedar retenidos en el intestino o alcanzar el hígado. A partir de los escasos datos disponibles sobre la velocidad con que estos roedores excretan los microplásticos y suponiendo que solo una parte de las partículas de entre 1 y 10 micrómetros es absorbida por el intestino, Koelmans y sus colaboradores han calculado que una persona podría acumular varios miles de partículas de plástico a lo largo de la vida.

Algunos han comenzado a indagar si es posible hallar microplásticos en los tejidos humanos. En enero, un equipo confirmó este extremo por primera vez después de analizar seis placentas. Los autores disgregaron el tejido con un producto químico, examinaron los restos que quedaban y acabaron encontrando 12 partículas de microplástico en cuatro de esas placentas. Rolf Halden, ingeniero sanitario-ambiental en la Universidad Estatal de Arizona en Tempe, afirma que, aunque no es imposible que esos fragmentos sean fruto de la contaminación de las placentas en el curso del muestreo y los análisis, destaca el empeño de los investigadores por evitar tal contaminación. Para ello, retiraron todos los objetos plásticos de los paritorios y comprobaron que un conjunto de materiales de control, sometido al mismo proceso de análisis que las muestras con fines comparativos, no estaba contaminado. «Demostrar de forma concluyente que una partícula dada procede realmente de un tejido supone todo un reto», afirma.

A quienes les preocupa la exposición a los microplásticos deben saber que es posible reducirla, asegura Li. En su trabajo con los utensilios de cocina observó que las cantidades desprendidas de plástico dependen sobre todo de la temperatura, razón por la que ha dejado de calentar la comida con el microondas en envases de ese material. Y en cuanto a los biberones, aconseja a los padres que enjuaguen el biberón esterilizado con agua fría que haya sido hervida en un recipiente que no sea de plástico, para eliminar así cualquier resto de microplástico desprendido durante la esterilización. Pueden preparar la leche en un envase de vidrio y llenar el biberón una vez que se haya enfriado. El equipo está pidiendo a familias voluntarias que proporcionen muestras de orina y deposiciones de sus bebés para analizar los microplásticos.

LA FRACCIÓN NANOMÉTRICA

Las partículas que son lo bastante pequeñas para penetrar y difundirse por los tejidos, o incluso por las células, son las más preocupantes y merecen más atención en las muestras ambientales, afirma Halden. En un estudio en el que un grupo de hembras gestantes de ratón inhalaron partículas sumamente diminutas, se comprobó que iban a parar a casi todos los órganos fetales. «Desde la perspectiva del riesgo, es ahí donde reside la verdadera preocupación, y donde precisamos más datos.»

Para poder llegar hasta el interior de las células, las partículas deben medir menos de unos cientos de nanómetros. Hasta 2018 no existía ninguna definición formal de nanoplástico. Ese año, unos investigadores franceses propusieron como límite un tamaño de 1 micrómetro: lo bastante pequeño para permanecer suspendido en la columna de agua, donde puede ser más fácilmente ingerido, pero sin hundirse o flotar en la superficie, como hacen los microplásticos, aclara Alexandra ter Halle, química analítica en la Universidad Paul Sabatier, en Toulouse.

Sin embargo, no se sabe casi nada de ellos; son invisibles y no pueden recolectarse con facilidad. El simple intento de medirlos ha dejado confusos a los científicos.

La longitud, la anchura y la composición química de las partículas de plástico de escasos micrómetros se pueden medir y

analizar con el microscopio óptico y el espectrómetro, instrumento este último que diferencia las partículas en virtud de su distinta interacción con la luz. Por debajo de esa escala resulta difícil distinguir lo que es plástico de lo que no lo es, como las partículas del sedimento marino o las células vivas. «Buscamos una aguja en el pajar, pero esta tiene el mismo aspecto que el heno», compara Roman Lehner, especialista en nanomateriales de la asociación Sail and Explore, un grupo de investigación suizo sin ánimo de lucro.

En 2017, Ter Halle y sus colaboradores confirmaron por primera vez la presencia de nanoplásticos en una muestra ambiental, en concreto, en agua recogida en el océano Atlántico. Extrajeron los sólidos coloidales del agua, filtraron todas las partículas mayores de 1 micrómetro, incineraron la fracción restante y, con un espectrómetro de masas (aparato que fragmenta las moléculas y clasifica los pedazos en función de la masa molecular), comprobaron que los restos habían contenido polímeros plásticos.

Sin embargo, eso no dio información sobre las dimensiones y la forma exacta de los nanoplásticos. A Ter Halle se le ocurrió una idea mientras estudiaba la superficie de dos envases de plástico deteriorados que recogió durante la expedición. Había observado que los primeros cientos de micrómetros, los más superficiales, habían devenido cristalinos y quebradizos, así que pensó que podría suceder lo mismo con los nanoplásticos que probablemente se desprenden de esas superficies. Por ahora, como no es posible recolectar nanoplásticos del ambiente, los investigadores pulverizan en el laboratorio el plástico que someten a prueba y esperan obtener partículas similares.

Fabricar nanoplásticos «caseros» para investigarlos tiene una ventaja: es posible introducir en ellos marcadores para seguir más fácilmente su rastro dentro de los organismos de experimentación. Lehner y sus colaboradores prepararon partículas nanométricas de plástico fluorescentes y las depositaron bajo el tejido formado por células epiteliales del intestino humano. Las células absorbieron las partículas, pero no mostraron indicios de citotoxicidad.

Hallar pedacitos de plástico alojados en cortes intactos de tejido, obtenidos mediante biopsia, por ejemplo, y observar algún efecto patológico supondría la pieza definitiva para completar el rompecabezas referente a los riesgos de los microplásticos, explica Lehner. Sería «muy conveniente», opina Halden. Pero para alcanzar los tejidos, las partículas tendrían que ser muy pequeñas, así que ambos investigadores creen que será muy difícil detectarlas de forma concluyente.

Recabar todos esos datos exigirá muchísimo tiempo. Ter Halle ha colaborado con ecólogos para cuantificar la ingesta de microplásticos en el medio natural. Analizar únicamente las partículas mayores de 700 micrómetros en unas 800 muestras de insectos y peces conllevó miles de horas, explica. Ahora examinan las partículas de entre 25 y 700 micrómetros. «Es difícil y tedioso. Vamos a tardar mucho en cosechar resultados», asegura. Y añade que mirar la franja más diminuta «exige un esfuerzo exponencial».

NO HAY TIEMPO QUE PERDER

De momento los especialistas creen que los niveles de microplásticos y nanoplásticos dispersos en el ambiente no son lo bastante altos como para afectar a la salud humana. Pero no cesarán de aumentar. En septiembre de 2020, un equipo de investigación pronosticó que la cantidad de plástico que cada año se suma a los residuos existentes, ya sean depositados cuidadosamente en vertederos impermeabilizados o esparcidos por la tierra y el mar, podría pasar de los 188 millones de toneladas en 2016 a los 380 millones en 2040, más del doble. Calculan los expertos que, para entonces, cerca de 10 millones de toneladas podrían vagar en forma de microplásticos, cifra que no incluye las partículas que se erosionan constantemente de los residuos ya depositados.

Es posible controlar algunos de nuestros residuos plásticos, explica Winnie Lau, de la organización The Pew Charitable Trusts, en Washington D. C., y autora principal del estudio. Según los investigadores, si en 2020 se hubieran adoptado todas las soluciones ya ensayadas para poner freno a la contaminación por plásticos, tales como la instauración de los sistemas de reutilización, la sustitución por materiales alternativos y el reciclaje, y dichos esfuerzos se hubiesen redoblado con rapidez, la cantidad de residuos plásticos podría reducirse a 140 millones de toneladas anuales en 2040.

Los mayores recortes, con diferencia, se conseguirían restringiendo los plásticos de un solo uso. «No tiene ningún sentido fabricar cosas que se utilizan durante 20 minutos y tardan en desaparecer 500 años. Es insostenible, se mire como se mire», sentencia Galloway.

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 593, págs. 22-25, 2021.
Traducido y adaptado con el permiso de Nature Research Group © 2021

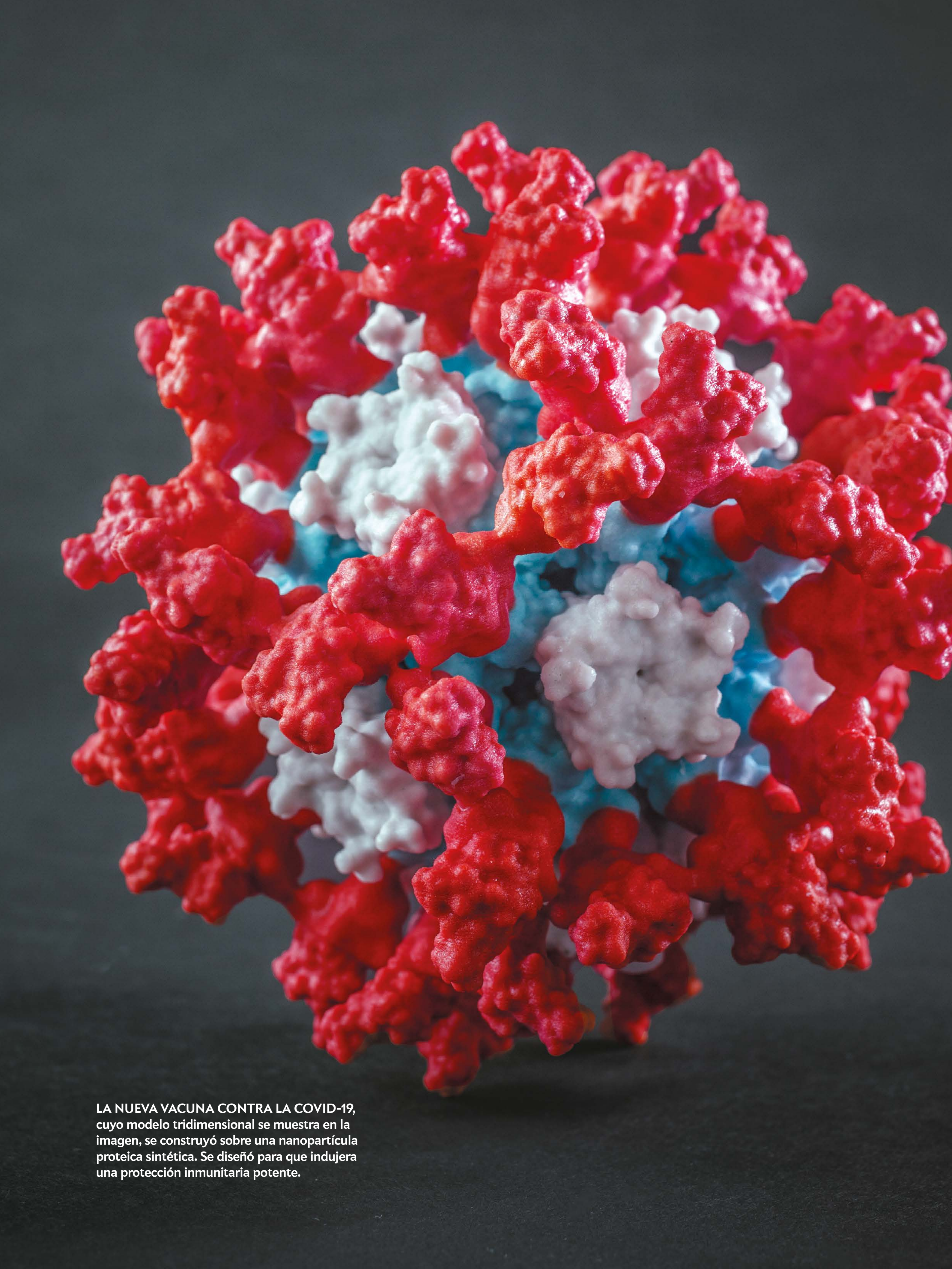
Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Bioavailability and effects of microplastics on marine zooplankton: A review. Zara L. R. Botterell et al. en *Environmental Pollution*, vol. 245, págs. 98-110, febrero de 2019.
Solving the nonalignment of methods and approaches used in microplastic research to consistently characterize risk. Albert A. Koelmans et al. en *Environmental Science & Technology*, vol. 54, págs. 12307-12315, septiembre de 2020.
Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. Antonio Ragusa et al. en *Environment International*, vol. 146, artículo n.º 106274, enero de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

La acción oculta de los disruptores endocrinos. Esther Fuentes y Ángel Nadal en *IyC*, agosto de 2017.
Una estrategia global contra la contaminación por plásticos. Arturo Castillo Castillo en *IyC*, agosto de 2021.



LA NUEVA VACUNA CONTRA LA COVID-19, cuyo modelo tridimensional se muestra en la imagen, se construyó sobre una nanopartícula proteica sintética. Se diseñó para que indujera una protección inmunitaria potente.

BIOQUÍMICA

Proteínas artificiales

Las nuevas moléculas podrían revolucionar la biología y dar lugar a una nueva vacuna contra la COVID-19

Rowan Jacobsen

Fotografías de Timothy Archibald

Rowan Jacobsen es periodista y autor de varios libros y artículos sobre geografía, biología y medioambiente.



Un viernes de abril de 2020, bien entrada la noche, Lexi Walls estaba a solas en su laboratorio de la Universidad de Washington, nerviosa, a la espera de los resultados del experimento más importante de su vida. La joven bióloga estructural, experta en coronavirus, llevaba tres meses trabajando sin parar para desarrollar una nueva clase de vacuna contra el patógeno que está causando estragos en el mundo. Esperaba que su estrategia, de tener éxito, no solo domase la COVID-19, sino también que revolucionase el campo de la vacunología y nos enseñara el camino para derrotar cualquier enfermedad infecciosa, desde la gripe hasta el VIH. A diferencia de otras vacunas, la de Walls no se basaba en compuestos naturales, sino en proteínas artificiales diminutas diseñadas por ordenador. Esta creación ha marcado el comienzo de un extraordinario avance en nuestra capacidad para rediseñar la vida.

Las proteínas son unas intrincadas máquinas de dimensiones nanométricas que desempeñan la mayoría de las tareas de los seres vivos gracias a que interaccionan constantemente entre ellas. Digieren la comida, combaten a los invasores, reparan los daños, perciben el entorno, transportan señales, ejercen presión, ayudan a crear los pensamientos y se replican. Formadas por una ristra de moléculas más sencillas denominadas aminoácidos, se retuercen y se repliegan en estructuras tridimensionales complejísimas. Como en la papiroflexia, la forma viene regida por el orden y el número de sus aminoácidos, los cuales se atraen y repelen con fuerzas muy bien definidas. La complejidad de estas interacciones es tan grande y la escala tan pequeña (una célula contiene de media 42 millones de proteínas) que nunca hemos logrado dilucidar las reglas que rigen sus contorsiones y hacen que una retahíla de aminoácidos se convierta en algo funcional. Muchos expertos suponen que nunca lo conseguiremos.

Pero los nuevos avances y logros de la inteligencia artificial están sonsacando a las proteínas sus secretos. Además, se están forjando herramientas bioquímicas que podrían transformar el mundo. Estas permitirán utilizar las proteínas para construir nanobots que se enfrenten a las enfermedades infecciosas, que envíen señales por el cuerpo, que desmantelen las moléculas tóxicas en sus unidades más básicas, o que capten la luz. Crearemos así instrumentos biológicos destinados a un determinado fin.

Walls se halla en la vanguardia de estas investigaciones. Tras doctorarse sobre la estructura de los coronavirus en diciembre de 2019, pasó a formar parte de lo que por entonces era un club muy pequeño. «Durante cinco años intenté convencer a la gente de que los coronavirus eran importantes. Al inicio de la defensa de mi tesis dije que expondría los motivos por los que esta familia de virus podría provocar una pandemia, y que no estábamos preparados para afrontarla. Por desgracia, esa predicción acabó haciéndose realidad.»

En cuanto empezó a hablarse de una neumonía nueva y misteriosa procedente de Wuhan, en China, a finales de diciembre de 2019, Walls sospechó que se debería a un coronavirus. El 10 de enero de 2020 se hizo pública la secuencia del genoma del SARS-CoV-2 y se pasó toda la noche analizándolo junto al bioquímico David Veesler, jefe de su laboratorio en la Universidad de Washington. Ella empezaba a sentir una enorme responsabilidad: puesto que sabían lo que hacer, debían ponerse manos a la obra.

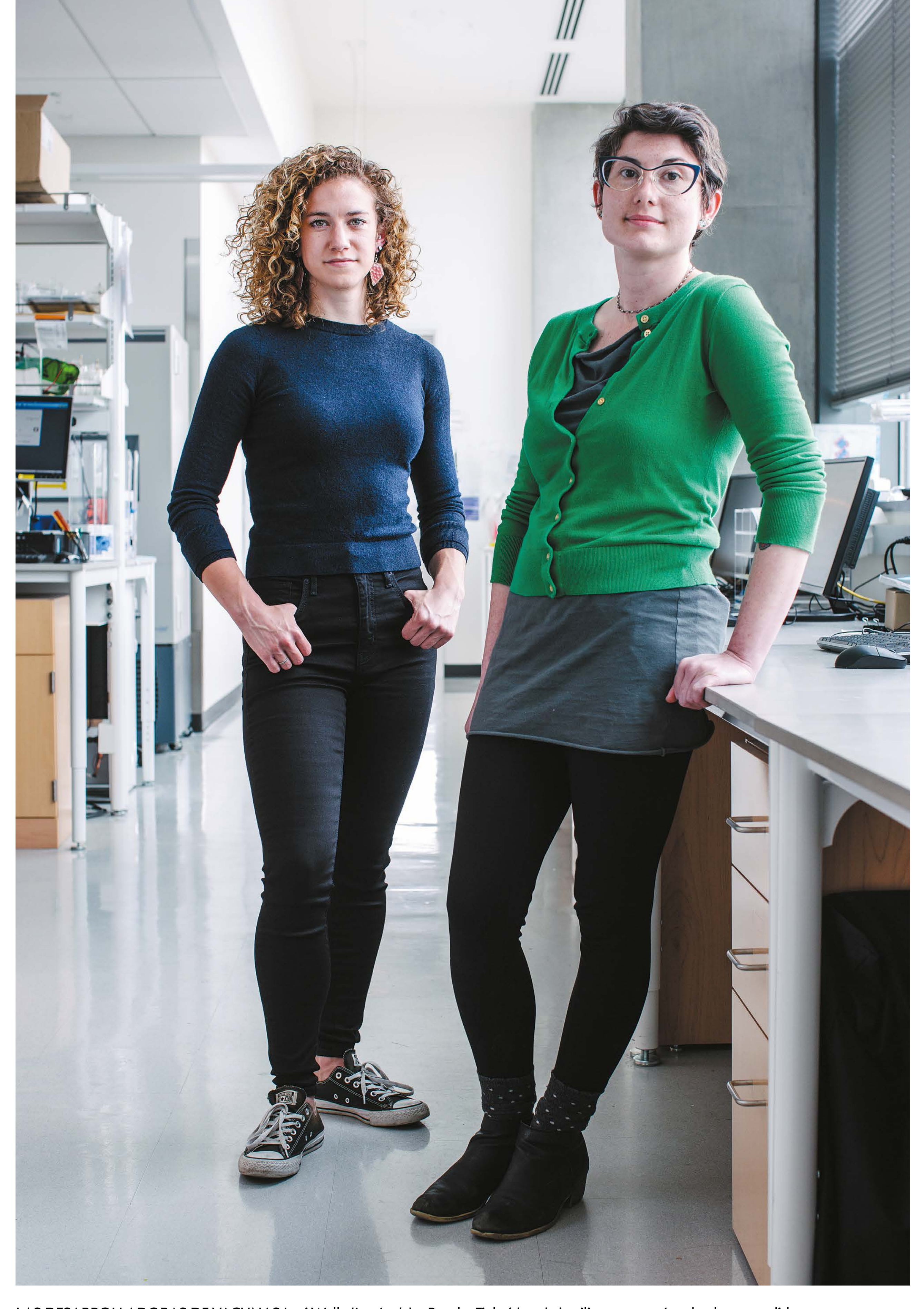
Al igual que otros coronavirus, el SARS-CoV-2 se asemeja a una pelotita recubierta de «espículas» proteicas. Cada

EN SÍNTESIS

Las proteínas desempeñan tareas esenciales en los organismos. Formadas por una serie de moléculas más sencillas denominadas aminoácidos, se retuercen y se repliegan en estructuras tridimensionales complejísimas.

Hasta hace poco, se desconocían las reglas que rigen sus contorsiones y les otorgan su funcionalidad. Pero los nuevos avances de la inteligencia artificial están ayudando a desvelar estos enigmas.

Estos conocimientos están impulsando el desarrollo de técnicas bioquímicas revolucionarias, como nanobots que se enfrentan a las enfermedades infecciosas o mejores vacunas contra la COVID-19.



LAS DESARROLLADORAS DE VACUNAS Lexi Walls (*izquierda*) y Brooke Fiala (*derecha*) utilizaron proteínas hechas a medida para crear una vacuna contra la COVID-19 nueva y prometedora. Esta expone una parte vulnerable del SARS-CoV-2 a las células del sistema inmunitario para provocar una respuesta neutralizante fuerte.

espícula (o espiga, del inglés *spike*) termina en un cúmulo de aminoácidos que forman una región denominada «dominio de unión al receptor» (DUR), cuya forma y carga de los átomos le permiten encajar perfectamente en una proteína de la superficie de las células humanas. La proteína vírica se acopla a su receptor como una nave espacial, un enganche que el virus utiliza para introducirse en la célula y replicarse dentro de ella.

Dado que esta función es muy peligrosa, el DUR es la diana principal de los anticuerpos del sistema inmunitario, que son otras proteínas sintetizadas por el organismo para que se fijen al DUR y lo aparten de su misión. Pero se necesita un tiempo para que las células especializadas fabriquen suficientes anticuerpos, al cabo del cual el virus ya habrá provocado un daño considerable.

La primera generación de vacunas anticovídicas, como las de ARN mensajero (ARNm), que están siendo nuestro salvavidas, presentan al organismo la espícula del virus (sin formar parte de ningún coronavirus funcional) para que el sistema inmunitario aprenda a reconocer el DUR y despliegue sus tropas. Pero el DUR suele esconderse dentro de la espícula, por lo que queda oculto a los anticuerpos capaces de fijarse a él. En consecuencia, se entorpece la respuesta inmunitaria. Además, una espícula que flota libremente no se parece a un virus natural y no siempre desencadenará una reacción fuerte, a menos que se utilice una gran dosis de la vacuna. Esta enorme dosis incrementa los costes y provoca efectos secundarios muy intensos.

A pesar del éxito de las vacunas, muchos expertos consideran que la inoculación de proteínas nativas es una estrategia provisional. «Cada vez está más claro que la administración de proteínas naturales o estabilizadas resulta insuficiente», explica Rino Rappuoli, jefe científico y director del desarrollo de vacunas de GlaxoSmithKline (GSK), el gigante farmacéutico afincado en el Reino Unido. La mayoría de las vacunas actuales, desde las infantiles hasta las de la gripe en los adultos, contienen proteínas naturales (los vacunólogos las denominan inmunógenos), y GSK fabrica muchas de ellas. Rappuoli propone diseñar inmunógenos más eficaces que las moléculas nativas.

Walls y Veesler se plantearon qué pasaría si, en vez de usar la espícula entera, le presentaran al sistema inmunitario solo la punta del DUR, para que este no pudiera esconderse detrás de nada. Walls explica que querían exponer el sistema inmunitario al componente clave para incitarle a que reaccionara contra él.

El problema inmediato de esta idea era que las células no fabrican los DUR aislados y el segmento por sí solo sería demasiado pequeño y raro para llamar la atención de las defensas. Pero Walls y Veesler conocían las personas que podrían ayudarles a solucionar ese problema. En su misma calle se encontraba el Instituto para el Diseño de Proteínas (IDP) de la Universidad de Washington, que es como el Laboratorio Bell pero para inventar proteínas. En el instituto conocían bien el plegamiento de las proteínas: habían diseñado y construido cientos de ellas, pequeñas y muy sencillas; se plegaban siempre como se esperaba y con la función prevista, y no se parecían a ninguna otra de los seres vivos.

En 2019, el grupo del IDP dirigido por el bioquímico Neil King había diseñado dos proteínas diminutas con interfaces complementarias que, cuando se introducían juntas en una solución, se encajaban y autoensamblaban en forma de nanopartículas. El tamaño de estas bolitas era similar al de un virus y podían adaptarse con un simple cambio en la secuencia. En los ensayos, cuando se ribetearon las nanopartículas con 20 proteínas de la espícula del virus sincitial respiratorio (responsable de la segunda enfermedad infantil más mortal en el mundo), estas desencadenaron una respuesta inmunitaria impresionante.

Walls y Veesler pensaron que se podía montar un núcleo nanoparticulado similar que portara solo el DUR, en vez de la espícula completa, y usarlo como vacuna anticovídica. De paso, la nanopartícula proteica sería más barata y se produciría más rápido que las vacunas con virus muertos o atenuados. También sería estable a la temperatura ambiental y se administraría con más facilidad que las frágiles vacunas de ARNm, que deben conservarse a temperaturas muy bajas.

Walls se puso en contacto con el IDP y colaboró con la especialista en nanopartículas Brooke Fiala, que trabajaba con King, en un prototipo de nanopartícula esférica que expusiera 60 copias del DUR. También intentaron algo muy novedoso: en vez de fusionar los DUR directamente a la superficie de la nanopartícula, los sujetarían con una cadena de aminoácidos corta, como si fueran cometas. Al dar cierta movilidad a los DUR, el sistema inmunitario vería el antígeno desde todos los ángulos y producía anticuerpos que lo atacarían por sitios muy diferentes.

Pero nadie sabía lo que acabaría sucediendo al final. Por eso, ese viernes del mes abril de 2020, Walls esperaba los resultados con los dedos cruzados. Tres semanas antes habían inyectado la vacuna de nanopartículas a una serie de ratones. A otros les inyectaron la espícula intacta que se emplea en otras vacunas. Luego les sacaron sangre y la mezclaron con un pseudovirus del SARS-CoV-2, una versión artificial que no se replica y cuyo manejo en el laboratorio no supone ningún riesgo. La idea era ver si los ratones vacunados habían desarrollado anticuerpos neutralizantes dirigidos contra el pseudovirus.

Los anticuerpos se toman su tiempo para actuar y, por eso, Walls tuvo que esperar hasta bien entrada la noche del viernes. Era impensable irse a casa y quedarse con la incógnita todo el fin de semana. Sus colegas le habían deseado suerte cuando salieron por la puerta. Veesler, antes de retirarse, le pidió que lo llamara en cuanto tuviera resultados.

Ya era noche cerrada y en el laboratorio reinaba un silencio sepulcral. Cuando llegó el momento, encendió un instrumento capaz de detectar y contar los anticuerpos unidos a las partículas víricas, respiró profundamente y ojeó los números.

En los ratones que habían recibido una dosis pequeña de la espícula intacta, el fracaso fue total: la estrategia no afectaba en absoluto a los pseudovirus. Los que recibieron una dosis alta de la espícula tenían anticuerpos con un efecto neutralizante moderado, similar al de otras vacunas. Pero los que recibieron la vacuna de nanopartículas ganaban por goleada al pseudovirus: los anticuerpos lo ahogaban con una capacidad neutralizante diez veces mayor que la de la preparación con la espícula a grandes dosis. Tal magnitud se mantuvo incluso con dosis minúsculas. Walls estaba contemplando algo que podría ser una vacuna ultrapotente, muy estable y barata.

Así que envió este mensaje de texto en mayúsculas a Veesler: «¡NEUTRALIZAN!», a lo que este respondió enseguida: «¡La próxima generación de vacunas anticovídicas está en tus manos!».

Esta fue la primera de las muchas pruebas que la vacuna tenía que superar. A partir de aquí, tendrían que comprobar la protección que ratones, primates no humanos y personas presentaban ante el virus vivo. Las nanopartículas pasaron a la última fase del ensayo a comienzos de 2021. En ese momento, ya se podía considerar que el diseño de proteínas había sido todo un éxito, un signo inequívoco de que, de pronto, contába-

mos con una tecnología que poco antes no lográbamos domeñar. Estábamos aprendiendo a esculpir la arcilla de la que todos estamos hechos.

LAS PROTEÍNAS, a pesar de que nos ocultan todavía muchos misterios, están en el eje de una revolución transformadora, similar a la de la ingeniería genética en las pasadas décadas. Un gen contiene simplemente la información para fabricar una proteína, en donde tres nucleótidos contiguos en el ADN, representados por letras, codifican un aminoácido, mientras que otro triplete codifica un aminoácido diferente. Una célula utiliza 20 aminoácidos como elementos fundamentales de las proteínas para darles su forma y función únicas. Las hay que son más flexibles que otras; algunas tienen carga positiva y otras negativa; o atraen el agua mientras que otras la repelen.

A lo largo del día, cada célula sintetiza muchas proteínas nuevas con el orden exacto de aminoácidos dictado por la secuencia del genoma. Estas proteínas se pliegan espontáneamente para adquirir siempre la misma forma que, junto con la carga de los átomos que quedan expuestos, determina su función: a qué responden, a qué se unen y qué hacen. Cuando decimos «tiene el gen de los pelirrojos» nos referimos a que posee los planos para las proteínas que sintetizan una clase concreta de pigmentos. Cuando decimos «tiene un gen que provoca cáncer de mama» nos referimos a que posee un gen mutado que hace que una proteína contenga un aminoácido incorrecto que arruina su función de tal manera que provoca el cáncer.

Si conociéramos el mecanismo del plegamiento de las proteínas, diseñaríamos nuevos fármacos que podrían poner trabas a las proteínas alteradas, o que las reemplazarían. Incluso podríamos indagar el origen de enfermedades como el alzhéimer, el párkinson, el húntington y la fibrosis quística, que están relacionadas con proteínas deformes.

Por desgracia, como las proteínas son tan pequeñas, es casi imposible averiguar lo que está sucediendo en ese nanomundo, incluso con microscopios potentes. No conocemos con precisión cómo consiguen plegarse correctamente, y mucho menos lo que está estropeado cuando se pliegan mal. Con un equipo especializado, se tarda un año y se necesitan 120.000 dólares para producir una imagen de alta resolución de una proteína. Conocemos la estructura de tan solo el 0,1 por ciento de las proteínas, y la de las demás la tenemos que adivinar. Por eso, el misterio central de la genética es que desconocemos la razón por la que algunos fragmentos del genoma están asociados a efectos físicos y mentales. No tenemos una piedra Rosetta para la estructura de las proteínas que nos traduzca entre el punto de partida de los genes y el punto final de las funciones corporales.

DISEÑO DE VACUNAS

Descubrir el punto débil de un virus

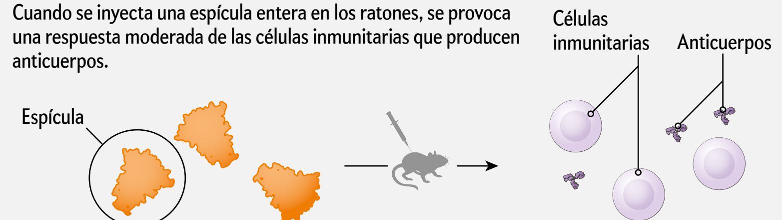
El SARS-CoV-2 camufla sus vulnerabilidades. Las vacunas actuales inducen la producción de anticuerpos porque introducen una versión de la proteína de la espícula del virus para que circule en libertad por el organismo. Pero la parte crucial de la espícula, el dominio de unión al receptor (DUR) con el que se fija a las células, a menudo permanece oculto entre los pliegues de la proteína completa. Esto dificulta que el sistema inmunitario se fije a él y produzca anticuerpos específicos. En la actualidad, los diseñadores de vacunas han aislado el DUR y lo han conectado a una nanopartícula sintética, con lo que consiguen generar una potente respuesta con anticuerpos.

SARS-CoV-2

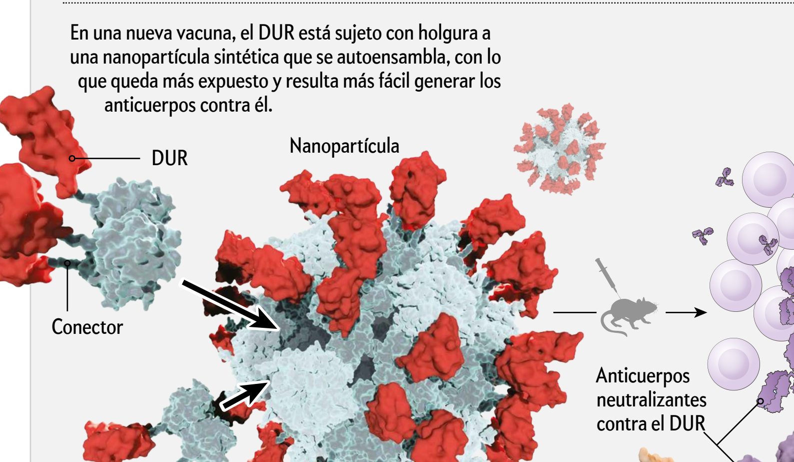
Proteína de la espícula

El segmento del DUR (*rojo*) en la espícula está arropado por la proteína completa hasta que se encuentra con el receptor de la célula (*lavanda*). Entonces emerge para fijarse a él.

Cuando se inyecta una espícula entera en los ratones, se provoca una respuesta moderada de las células inmunitarias que producen anticuerpos.



En una nueva vacuna, el DUR está sujeto con holgura a una nanopartícula sintética que se autoensambla, con lo que queda más expuesto y resulta más fácil generar los anticuerpos contra él.



FALCONIERI VISUALS (*ilustración*)



PARA NEUTRALIZAR UN VIRUS, Longxing Cao, del Instituto para el Diseño de Proteínas, desarrolló proteínas sintéticas pequeñas, que denominó minifijadores. Estos se aferran a la parte del coronavirus que se fija a las células y consiguen así detenerlo. Los minifijadores se podrían pulverizar en la nariz para impedir las infecciones.

En teoría, se podría predecir la estructura final de una proteína a partir de su secuencia, algo tan esencial para nuestros conocimientos que, en 2005, para el especial de su 125.º aniversario, la revista *Science* lo incluyó en la lista de preguntas sin respuesta más importantes de la ciencia. La realidad es que se ha conseguido tan solo con unas pocas proteínas muy sencillas. Por ejemplo, si se quiere construir una con forma helicoidal (una estructura parecida a un muelle, que es muy frecuente en las proteínas y les confiere estabilidad) hay que utilizar aminoácidos como la leucina, la alanina y el glutamato, que tienen la curva y complementariedad adecuadas para formar espirales regulares en las que se fijarán con fuerza a los aminoácidos que tienen por encima o por debajo en la hélice. Si se quiere acodar el muelle, habrá que añadir una prolina, que no tiene con quién fijarse y hace que el resto de la hélice cambie de dirección.

Los biólogos estructurales como David Baker, fundador del IDP, donde Walls y Veesler fueron a obtener las nanopartículas, han conseguido deducir algunas de estas reglas básicas. Su grupo ha incorporado estas rúbricas en un programa informático que predice estructuras, llamado Rosetta, y lo han utilizado para fabricar una serie de proteínas pequeñas, de tan solo unas cuantas docenas de aminoácidos. Algunos de sus éxitos han demostrado el gran potencial del campo, como unas «nanojaulas» que podrían utilizarse para empaquetar fármacos y transportarlos por el organismo; o unos detectores moleculares que se activan cuando se topan con células que exhiben en su superficie una combinación específica de aminoácidos característica de su naturaleza cancerosa.

Pero las proteínas más importantes de los seres vivos son mucho más grandes que estos ejemplos y contienen miles de aminoácidos, donde cada uno llega a interaccionar con todos sus vecinos; algunos forman enlaces tan fuertes como los del diamante, mientras que otros se repelen. Todas estas relaciones se establecen en función de la proximidad, por lo que las posibilidades se vuelven astronómicas con rapidez y hace mucho que las fórmulas para dilucidar la estructura final eluden nuestras mejores mentes y superordenadores.

Frustrados por este problema, en 1994 un grupo de biólogos computacionales decidió que se podrían obtener progresos con una competición amistosa. Dirigidos por John Moult, de la Universidad de Maryland, lanzaron el concurso CASP (siglas en inglés de «valoración crítica de la predicción de estructuras»). Moult se hizo con unas especificaciones detalladas de proteínas cuya estructura se había establecido hacía poco, pero que aún no era pública, y les envió la secuencia de nucleótidos a unos pocos laboratorios de investigación, que a su vez le devolvieron sus mejores propuestas para el aspecto final de la proteína.

Se puntuaron las predicciones por su similitud con la estructura real según el porcentaje de la molécula que acertaran. La arquitectura básica correcta valdría 50 puntos, se llegaría a 70 si los ángulos y enlaces entre las principales partes fueran buenos, y a 90 o incluso 100 si acertaban los hilos moleculares que brotaban de la proteína, a modo de cabellos.

Desde entonces, Moult ha venido celebrando el concurso cada dos años. Durante mucho tiempo, ni siquiera los mejores equipos conseguían proponer algo más que una conjetura. En 2012, el año en que se creó el IDP de Baker, los mejores equipos del CASP alcanzaron una puntuación promedio de 20, que no se mejoraría en los siguientes años. «Había momentos, después de algunos CASP, en los que miraba los resultados y me desesperaba», apunta Moult. «Parecía de chiste y me planteaba si valía la pena seguir.» Aparecieron algunos avances en el CASP11, en el que el promedio de las mejores puntuaciones se acercó a 30, con otro ligero rebote hasta el 40 en el CASP12.

Entonces llegó el CASP13 en 2018. Los mejores equipos, liderados por el IDP de Baker, mejoraron de nuevo, con un promedio cercano al 50. Pero se vieron superados por un concursante inesperado: DeepMind de Google, cuyo sistema de inteligencia artificial (IA) había dado una paliza en 2017 al mejor jugador del mundo de *Go* (el juego chino de estrategia). La IA obtuvo una puntuación promedio cercana a 57 por proteína.

Este resultado estremeció a los laboratorios de ingeniería de proteínas del mundo, pero resultó ser solo un ensayo general para el 2020, cuando las predicciones de DeepMind fueron certeras. Según Moult, «pensaba que no podía ser verdad, que en la siguiente fracasaría, pero acertaba una y otra vez».

DeepMind sacó de promedio un 92. En las más fáciles, colocaba prácticamente cada átomo en su sitio. Pero los resultados más impresionantes llegaron con algunas proteínas extremadamente difíciles que frustraban a la mayoría de los equipos. En cierta molécula, ningún grupo superó el 20, mientras que DeepMind alcanzó el 80.

Los resultados dejaron atónito a Moult: «llevo buena parte de mi vida con esto y nunca pensé que se obtendría este nivel de precisión atómica». Lo que le parece más impresionante es que DeepMind haya extraído las reglas básicas que se desconocían hasta ahora. «Es más que un mero reconocimiento de patrones: de alguna manera extraña, la máquina “aprende” física y calcula cómo se autoorganizan los átomos en una disposición de aminoácidos única.»

«Fue asombroso», confiesa el biólogo estructural y competidor del CASP Mohammed AlQuraishi, de la Universidad de Columbia. «Jamás en la vida creí que vería un avance científico tan repentino.» AlQuraishi espera que este logro transforme las ciencias biológicas.

El equipo de DeepMind espera publicar a finales de este año su método, con detalles sobre el funcionamiento. Algunos aspectos permanecerán inescrutables (la IA encuentra relaciones vagas que no pueden explicarse fácilmente con reglas), pero, por ahora, se tiene el esquema general.

Para predecir el efecto que tiene cada aminoácido sobre los otros, los programadores echaron mano de una técnica que les llamó la atención por ser responsable de los avances espectaculares que se acababan de obtener en la traducción automática de idiomas mediante la IA. Al igual que las proteínas, el lenguaje se asemeja a una cadena lineal de información que se repliega sobre sí misma para producir el mensaje. Una palabra como «la» revelaría su significante a partir de su uso en una frase totalmente diferente («Durante muchísimo tiempo, la IA no tenía sentido para mí. Y luego, después de leer mucho, la acabé entendiendo»). Cuando nos comunicamos, avanzamos y retrocedemos constantemente por esta cadena lineal, y prestamos atención a un cúmulo local de palabras para aprender lo que significa cada una en contextos diferentes. Una vez resuelto el significado, nos vamos a otro pasaje relacionado y entendemos dichas palabras a la luz de la nueva información.

DeepMind hace algo parecido con las proteínas al centrar su atención en un cúmulo local de aminoácidos y aprender tanto como puede acerca de su relación con los otros. Algunas parejas de aminoácidos, por ejemplo, parecen haber coevolucionado, y esta conexión limita sus posibles posiciones en la proteína. DeepMind utiliza esta información para saltar a una parte diferente de la secuencia y analizarla a la luz de lo que aprendió del primer cúmulo. Reitera el proceso muchas veces por todas

las partes de la cadena de aminoácidos y, al final, lo utiliza para construir una nube tridimensional de puntos que representa las relaciones entre los átomos que constituyen cada aminoácido. Básicamente, trata el plegamiento de las proteínas como un nuevo lenguaje extranjero que hay que descifrar.

Según AlQuraishi, a medida que otros laboratorios incorporen las técnicas de DeepMind y la moda de la predicción de proteínas se generalice, el período de ensayo y error se irá reduciendo hasta conseguir una proteína real que se pliegue como se espera. «Se propagará por todas partes y hará que el diseño de proteínas sea mucho más eficaz.»

Pero el equipo de DeepMind no pertenece a la ciencia aplicada, por lo que la IA no «perderá» el tiempo diseñando planos con los que construir proteínas complicadas por encargo. Su gran contribución será indirecta. Para el bioquímico Frances Arnold, del Instituto de Tecnología de California, ganador del premio Nobel de química en 2018 por mejorar el funcionamiento de las proteínas naturales mediante un método denominado evolución dirigida, «su trabajo pone de manifiesto el poder de las proteínas y el futuro prometedor de su manipulación artificial. Pero no se ha resuelto el problema del diseño ni de la modificación de las proteínas para solucionarle los problemas a la gente».

Una vacuna que se sintetice con facilidad y proteja de los virus mutantes que puedan aparecer sería justo la solución que estamos esperando

Ese trabajo recaerá sobre todos los Arnold y Baker de este mundo, que intentan utilizar las técnicas de DeepMind para dopar la capacidad de esculpir proteínas que tienen sus laboratorios. Según Baker, cuyo equipo volvió a quedar en un alejado segundo puesto en el concurso, «es un gran avance que, a mi parecer, hará que lo que ya funcionaba bien funcione aún mejor».

Como nos recordaba Arnold, nos hemos topado con un enorme problema que está arruinando el planeta: la COVID-19. Cuando surgió, Baker y algunos colaboradores de su laboratorio buscaron la solución en las proteínas. Introdujeron la secuencia de nucleótidos del coronavirus en Rosetta, su programa informático de predicción de estructuras proteicas, para producir un modelo tridimensional. Luego lo analizaron minuciosamente para encontrar los puntos débiles. Al igual que Walls, se concentraron en el DUR de la espícula. Pero en vez de fabricar una vacuna que desencadenara la producción de anticuerpos, Baker quería construir un anticuerpo mejorado: buscaba una proteína cuyo único propósito fuera atrapar el DUR, como un velcro microscópico.

Aunque resulten muy sorprendentes, los anticuerpos no son perfectos. El organismo no sabe diseñar por adelantado y a medida un anticuerpo contra un patógeno que nunca ha visto, por lo que fabrica un montón de versiones diferentes. Cuando un invasor nuevo hace acto de presencia, las células del sistema inmunitario hacen muchas copias de cualquier anticuerpo que consiga fijarse a él, pero el ajuste no es siempre suficientemente fuerte para detener al patógeno. Los anticuerpos naturales son también proteínas bastante grandes que no siempre logran su cometido de acabar pegándose al DUR del virus.

Así llegaron a los «minifijadores», como Baker los llama: proteínas sintéticas pequeñas que se diseñan aminoácido a aminoácido para que se ajusten con precisión al DUR de un virus. Al carecer de trozos superfluos, se pegan con más fuerza. Y como son pequeños y muy ligeros, se pueden pulverizar en la nariz en vez de inyectarlos en el brazo. ¡Nada de agujas!

El sueño de Baker era crear un medicamento en lugar de una vacuna: un pulverizador nasal que, al primer síntoma de infección (o con antelación como prevención diaria), inundara la nariz con una bruma de minifijadores que recubrirían el DUR de las partículas víricas antes de que consiga pegarse a algo. Duraría lo mismo que un paquete de lentejas. Se reformularía con rapidez para cualquier patógeno nuevo. Los profesionales sanitarios, los profesores y cualquier otro trabajador de primera línea se lo podrían restregar en las manos, como una especie de sistema inmunitario civilizado de diseño.

Para manipular el minifijador, Longxing Cao, investigador posdoctoral del laboratorio de Baker que lideraba el proyecto, usó la estructura del DUR del virus para explorar la colección de diminutas proteínas que el IDP había diseñado anteriormente en busca de formas complementarias. Al igual que un escalador ante una pared desafiante, el minifijador necesitaba ser suficientemente pequeño para colarse en la hendidura donde se aloja el DUR y poseer una forma que le permita asirse con firmeza a los sitios correctos. Cao catalogó las zonas del DUR en aquellas que acumulaban aminoácidos con carga positiva, con carga negativa, o hidrófobas, para luego dotar a los minifijadores de tantas zonas complementarias como fuera posible. Analizó millones de posibilidades en Rosetta.

Los mejores diseños estaban formados por tres hélices conectadas como las salchichas mediante cadenas cortas de aminoácidos. Cada minifijador tenía unos sesenta aminoácidos, o sea, un tamaño diez veces menor que un anticuerpo y veinte veces más pequeño que la espícula coronavírica.

A continuación, por supuesto, había que trasladar la proteína desde Rosetta al mundo real, lo que resultó sorprendentemente fácil. Sintetizar el ADN (las A, C, G y T del material genético) tenía un precio irrisorio en unos dispositivos que se parecen a las impresoras de chorro de tinta. Cao sintetizó cadenas de ADN con la secuencia de sus minifijadores y las insertó en la levadura que, como un ganado programable, bombeaba las proteínas diminutas junto a las normales para que las recogiera y analizara.

El mejor minifijador se pegaba al virus con una eficacia seis veces mayor que los mejores anticuerpos conocidos, y mucho mejor que cualquier molécula del planeta, al formar muchísimas uniones fuertes con el DUR. Resultaba extraordinariamente estable y se pulverizaba con facilidad (no se quedaba en la boquilla). Los hámsteres que recibieron la bruma intranasal se volvieron inmunes a la COVID-19. «Estaba muy entusiasmado, pero no sorprendido», confiesa Cao. Se espera que los ensayos clínicos de los minifijadores empiecen a finales de 2021 y mu-

chos laboratorios del mundo ya están explorando otra manera de usarlos para que ayuden al funcionamiento del organismo o a alejar las enfermedades.

A pesar del enorme optimismo que suscita esta técnica, algunos investigadores de bioseguridad han expresado su inquietud por las proteínas que se diseñen con propósitos perversos. Por ejemplo, se podrían pulverizar priones (responsables del «mal de las vacas locas» y otras enfermedades neurodegenerativas), unas proteínas mal plegadas que, a su vez, hacen que otras las imiten y provoquen una reacción en cadena mortífera por contagio. La Convención de Armas Biológicas, firmada por casi todas las naciones, prohíbe, de hecho, el desarrollo o el uso de armas biológicas con patógenos, pero a nadie se le ocurrió nunca extenderla a proteínas que nunca hayan formado parte de un organismo.

«Nos encontramos ante una preocupación real», asegura la experta en bioseguridad Filippa Lentzos, del King College de Londres, «porque las futuras armas biológicas no necesariamente nos enfermarán con patógenos». Las miniproteínas sintéticas podrían o no estar bajo el control de la convención, «por lo que la situación legal es un asunto relevante». Pero Lentzos también reconoce que las miniproteínas artificiales constituirían una amenaza muy poco probable, y no las considera preocupantes. «Si quieren causar daños, ¿merece la pena enfrascarse en algo tan sofisticado y complicado como el diseño de proteínas? Se podrían usar muchos otros recursos naturales», apunta. Dado que la naturaleza está llena de toxinas y patógenos que se podrían fabricar con facilidad, habría maneras mucho más fáciles de dañar a la gente.

En este momento se está invirtiendo mucha energía y conocimientos científicos en las proteínas de nuevo cuño con alguna utilidad, por lo que no sería descabellado que trabajen en ellas en un hospital cercano a alguno de nosotros. Como la mayoría de los casi 8 mil millones de personas del mundo están a la espera de una vacuna contra la COVID-19, las nanopartículas de Walls constituirían un candidato prometedor.

Después de neutralizar con éxito el pseudovirus en las células de ratón, el siguiente gran ensayo de la vacuna fue contra el coronavirus real. Para eso, Walls tuvo que enviar sus ratones al laboratorio de Ralph S. Baric, uno de los expertos en coronavirus más sobresalientes del mundo, en la Universidad de Carolina del Norte. El laboratorio cuenta con instalaciones con el nivel de bioseguridad requerido para trabajar con el virus intacto. Baric y sus colaboradores examinan muchas vacunas experimentales, por lo que en junio de 2020 Walls se alegró cuando le enviaron un correo electrónico tan alentador: el potencial neutralizante de la vacuna de nanopartículas se salía de la representación gráfica porque era lo más alto que habían analizado nunca.

«Todo funcionaba mejor de lo que esperábamos», afirma Walls. Cuando expusieron los ratones al virus real, evolucionaron bien, estaban «completamente protegidos, sin signos de la enfermedad». Más tarde, Walls encontró que, si reducía nueve veces la dosis ya de por sí baja y añadía un recuerdo, funcionaba igual de bien. En enero de este año empezaron los primeros ensayos clínicos de la vacuna en el estado de Washington y en Corea del Sur.

A pesar de que estos ensayos iban bien, dado que el virus generaba nuevas olas de variantes capaces de evadir algunos de los anticuerpos desencadenados por la primera generación de vacunas, Walls se puso a diseñar una nanopartícula nueva y mejorada. En vez de limitarse a las copias del DUR del SARS-CoV-2, la nueva versión contenía un mosaico de cuatro DUR diferentes: del SARS-CoV-2, del virus del SARS original de principios de 2000, y de otros dos coronavirus. Este amplio espectro de DUR desencadenó una respuesta de anticuerpos robusta contra todos los coronavirus analizados, incluida la más escurridiza de las variantes.

Una vacuna eficaz en dosis diminutas, que se sintetiza con facilidad, que cuesta poco fabricarla, que no hay que refrigerar, y que protege contra un montón de virus mutantes, incluidos los que puedan surgir en el futuro, podría ser exactamente la solución esperada. Estas ventajas han llamado la atención de los pesos pesados de las vacunas en el mundo, entre ellos Rappuoli, de GSK, que tiene claro que «a nuestro sistema inmunitario le gustan las nanopartículas, por lo que son lo mejor que tenemos». En un comentario reciente en la revista científica *Cell*, Rappuoli ha predicho que tales moléculas de diseño marcarán el comienzo de una nueva era de vacunas: «a partir de aquí, las posibilidades son infinitas».

Esta capacidad no termina en las vacunas. En la nueva era de los aminoácidos, que sepamos diseñar nanomáquinas inteligentes a escala atómica podría convertir el combate contra una enfermedad en un ejercicio de ingeniería. Walls apunta que «cuando abordemos problemas en los que intervenga alguna proteína, deberemos tenerlo en mente. Habrá que conocerla a fondo y saber que podemos diseñarle soluciones. Cada día llegan nuevos éxitos», y algunos de ellos proceden de fuera de la medicina. Por ejemplo, relacionado con la ciencia de los materiales, el IDP ha inventado proteínas que se autoensamblan en panales microscópicos que favorecen el depósito de minerales, un nuevo modo de producir superconductores y baterías eficientes. En otro proyecto se están elaborando proteínas que recogen la luz, igual que hacen las proteínas fotosintéticas de las plantas, para convertirla en electricidad y combustible.

A medida que crezca el kit de herramientas de la era de los aminoácidos, las proteínas naturales que utilizamos en los tratamientos (como la insulina para los diabéticos) nos acabarán pareciendo tan arcaicas como las raederas y raspadores que utilizaban nuestros ancestros de la Edad de Piedra. De la misma manera, las proteínas de diseño que hoy nos fascinan nos parecerán como relojes de sol y ruedas de carro. Se nos escapan los detalles de un futuro lleno de moléculas personalizadas. Pero al igual que en estas proteínas artificiales, esos detalles acabarán tomando forma de una manera elegante. IyC

PARA SABER MÁS

Elicitation of potent neutralizing antibody responses by designed protein nanoparticle vaccines for SARS-CoV-2. Alexandra C. Walls et al. en *Cell*, vol. 183, págs. 1367-1382.e17, noviembre de 2020.

End-to-end differentiable learning of protein structure. Mohammed AlQuraishi en *Cell Systems*, vol. 8, págs. 292-301.e3, abril de 2019.

Designed proteins assemble antibodies into modular nanocages. Robby Divine et al. en *Science*, vol. 372, eabd9994, abril de 2021.

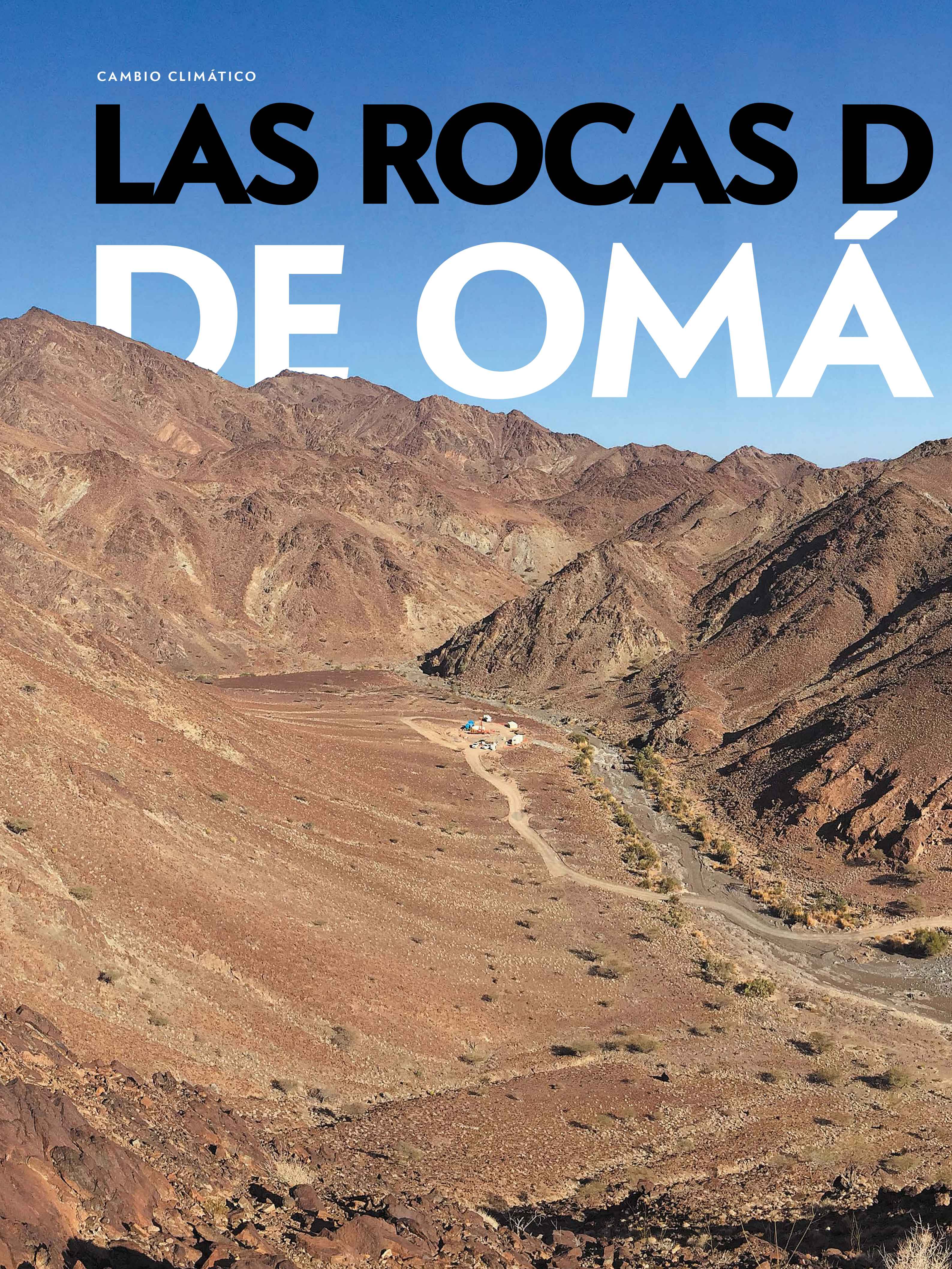
EN NUESTRO ARCHIVO

Estructura y estabilidad de las proteínas. Ana Rosa Viguera en *IyC*, marzo de 2003.

El caos ordenado de las proteínas. A. Keith Dunker y Richard W. Kriwacki en *IyC*, junio de 2011.

Inteligencia artificial y plegamiento de proteínas. Ewen Callaway en *IyC*, febrero de 2021.

LAS ROCAS D
DE OMÁ



E CARBONO

N

¿Podría un inusual afloramiento rocoso solucionar el problema climático del planeta?

Douglas Fox



EN TODO OMÁN hay al descubierto montañas de rocas del manto que suelen encontrarse a muchos kilómetros bajo tierra. Al interactuar con el dióxido de carbono atmosférico, lo convierten en piedra.

Douglas Fox escribe acerca de ciencia polar, clima y biología. Es colaborador de *New Scientist*, *Discover* y *Christian Science Monitor*, entre otras publicaciones, y ha recibido numerosos premios, como el de la Sociedad Americana de Periodistas y Autores.



WADI LAWAYNI ES UN REMOTO VALLE DESÉRTICO ENCLAVADO EN LAS montañas de al-Hayar, en el interior de Omán. Para llegar allí, el visitante ha de seguir un solitario camino de tierra que se va estrechando hasta quedar reducido a unas huellas de neumáticos que discurren por un cauce pedregoso. Las aguas subterráneas de esta región afloran de tanto en tanto en pequeños estanques de un tono azulado, saturados de sales alcalinas. En ocasiones, el agua está tan repleta de hidrógeno gaseoso que burbujea como el champán al extraerla de un pozo.

El valle presenta algunos arbustos espinosos dispersos y está rodeado de crestas erosionadas de color marrón apagado que se elevan cientos de metros. Esa roca anómala se compone de minerales que son químicamente inestables en la superficie de la Tierra. Pudo formarse en el manto (la capa intermedia de nuestro planeta, que nunca hemos visto directamente), a una profundidad de decenas de kilómetros, muy superior a la de cualquier pozo petrolífero o mina de diamantes. Hace unos 80 millones de años, un accidente tectónico empujó la roca a la superficie. Ahora que está expuesta a los elementos, sufre una descomposición geoquímica latente y flatulenta.

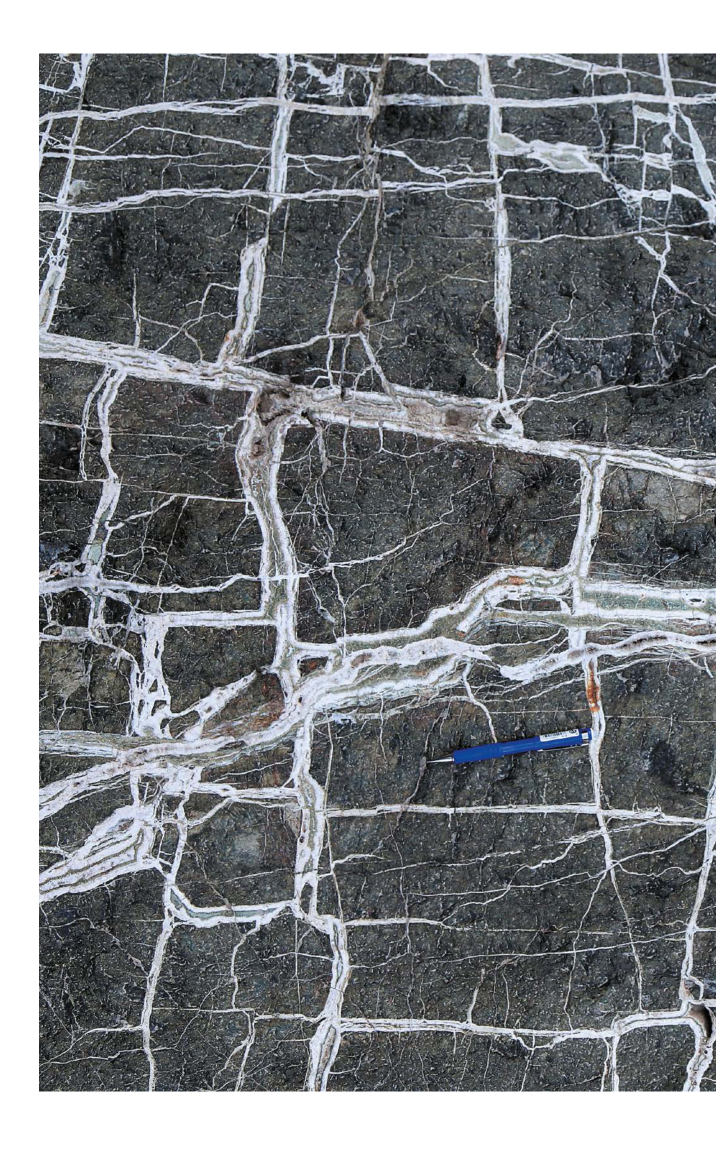
Peter Kelemen, geólogo del Observatorio Terrestre Lamont-Doherty de la Universidad de Columbia, cree que esa rareza geológica podría ayudarnos a cambiar el curso de la emergencia climática. Me explicó su idea una tarde de enero de 2018 en Wadi Lawayni, mientras reposábamos en unas sillas plegables bajo la exigua sombra de una acacia esmirriada. El suelo de grava estaba sembrado de excrementos resecos de camello. A cien metros, bajo un toldo, habían improvisado un laboratorio provisto de mesas, productos químicos y un escáner para examinar muestras de roca. Kelemen (que ahora cuenta 65 años) tenía el pelo gris y muy corto, y la piel curtida por años de trabajo de campo. Me mostró la pared rocosa que se alzaba a nuestra espalda, hecha de peridotita, una roca parduzca y desgastada procedente del manto. La lluvia que se filtra a través de sus grietas lleva disueltos oxígeno y dióxido de carbono (CO_2) atmosféricos. Cuando el agua y los gases reaccionan con la roca, se forman vetas sólidas de nuevos minerales,

EN SÍNTESIS

En Omán hay montañas de rocas procedentes del manto que, al reaccionar con el dióxido de carbono disuelto en el agua de lluvia, lo solidifican en forma de vetas de carbonatos minerales.

Acelerar ese proceso capturando el CO_2 atmosférico, concentrándolo en agua e inyectando esta en las rocas a gran profundidad podría ayudar a combatir el calentamiento global, aunque harían falta grandes infraestructuras.

Una compañía privada está a punto de realizar la primera prueba piloto de esta «carbonatación mineral» en rocas del manto. Si se comprueba que el CO_2 se mineraliza deprisa, podrían acometerse proyectos más ambiciosos.



que van internándose en la piedra como las raíces de un árbol. La roca estaba surcada por esas vetas de color blanco cremoso. Kelemen señaló una de un centímetro de ancho, compuesta por carbonato de magnesio. «La mitad es CO_2», observó. Le di unos golpecitos con un guijarro y emitió un sonido vítreo.

Kelemen calcula que las rocas del manto expuestas en Omán absorben y petrifican hasta 100.000 toneladas de CO_2 al año. Eso supone en torno a un gramo del gas de efecto invernadero por metro cúbico de piedra. «Si lo aumentamos un millón de veces, tendríamos mil millones de toneladas de CO_2 por kilómetro cúbico de roca y año», razona Kelemen. Él cree que es técnicamente factible, y Omán, con unos 15.000 kilómetros cúbicos de esa roca, tiene capacidad de sobra. Para acelerar las reacciones naturales, Kelemen pretende perforar hasta varios kilómetros de profundidad (donde las rocas están más calientes) y bombear agua de mar saturada de CO_2 extraído del aire.

Otros afloramientos similares emergen del interior del planeta en regiones como Alaska, Canadá, California, Nueva Zelanda o Japón. Kelemen estima que las rocas de todo el mundo podrían almacenar de 60 a 600 billones de toneladas de CO_2, entre 25 y 250 veces la cantidad que ha emitido la humanidad desde 1850. Y afirma que explotar ese depósito pétreo podría tener un impacto enorme. Un informe de 2019 del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático concluyó que no será posible limitar el calentamiento global a 1,5 grados Celsius (algo que se cree necesario para evitar efectos catastróficos) a no ser que eliminemos de algún modo entre 100.000 millones y un billón de toneladas de CO_2 atmosférico antes de 2100. Si el proceso comenzara en 2050, eso supondría retirar entre 2000 y 20.000 millones de toneladas anuales.

Para materializar esa idea, habría que construir una red extensa y global de equipos que capturen el CO_2 del aire y lo inyecten en pozos perforados en la roca del manto. Sería una especie de imagen especular de la infraestructura que hoy extrae combustibles fósiles, los cuales liberan CO_2 a la atmósfera al quemarse. Kelemen se imagina Omán convertido en un bullicioso punto neurálgico de esa nueva y vasta industria.

La viabilidad de esa «contrainfraestructura» depende de las investigaciones que se desarrollan en Omán. Mientras charlábamos bajo el árbol, el equipo de Kelemen se preparaba para perforar el suelo de Wadi Lawayni y extraer 400 metros de testigos de roca, a fin de estudiar las reacciones químicas que ocurrían bajo nuestros pies. Una excavadora retumbaba en la distancia mientras cavaba un foso como paso previo a la operación.

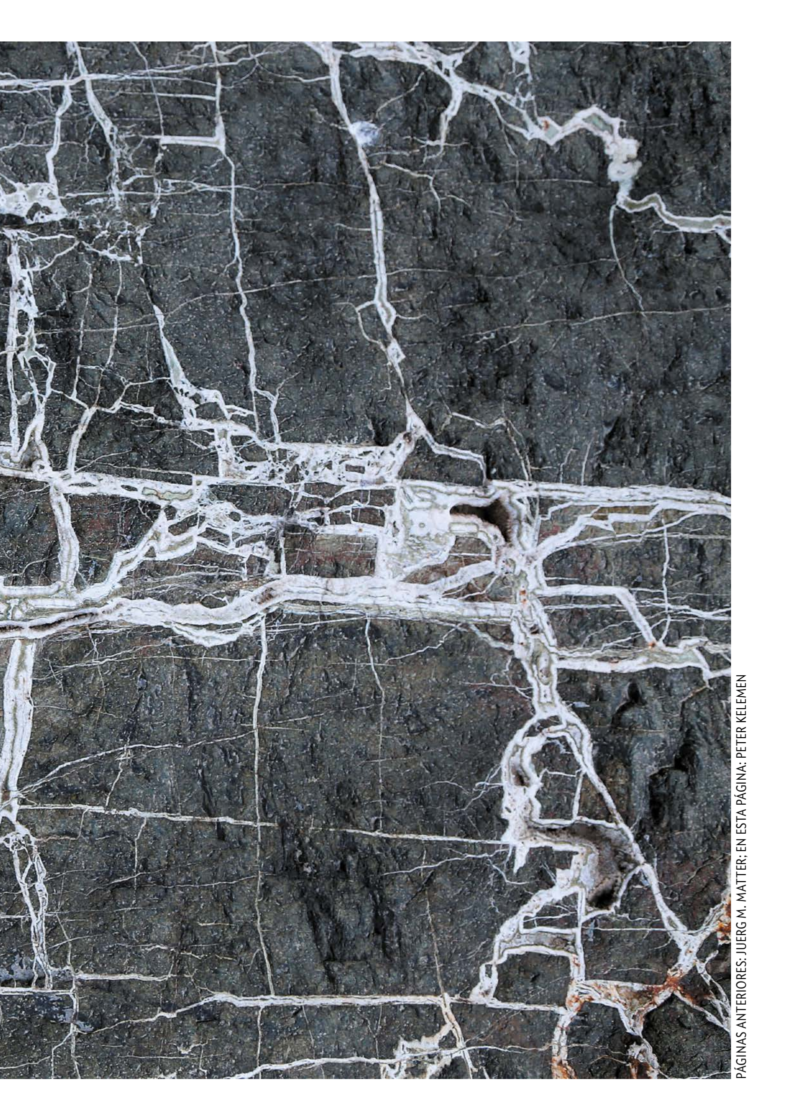
Los resultados, publicados en 2019 y 2020, mostraron una vía para potenciar las reacciones. Estaba previsto que a finales de mayo de este año llegaran a Wadi Lawayni nuevos trabajadores para realizar la primera prueba del mundo de inyección y mineralización de CO_2 en rocas del manto. Si el experimento tiene éxito, quizá suponga el primer paso hacia la transformación de Omán, o incluso de toda la península arábiga, en un gran centro industrial para gestionar la emergencia climática.

REACCIONES RÁPIDAS

Hace décadas que los científicos hablan de capturar el CO_2 atmosférico e inyectarlo en el suelo para contrarrestar las emisiones de gases de efecto invernadero. Pero cada vez más estudios subrayan la urgencia de lograr «emisiones negativas de carbono». Se han propuesto diversas estrategias. Replantar bosques o fertilizar el océano fomentaría el crecimiento de los árboles o el fitoplancton, que fijan el CO_2 mediante la fotosíntesis [*véase* «Secuestro de carbono en los suelos forestales», por Pere Rovira; Investigación y Ciencia, marzo de 2017]. Mejorar la gestión de las tierras agrícolas permitiría que una mayor parte del CO_2 absorbido por los cultivos permaneciera en el suelo tras la cosecha. Los equipos de captura de carbono podrían filtrar los gases que expulsan las chimeneas de fábricas o centrales eléctricas, y miles de máquinas de «captura directa del aire» podrían retirar el CO_2 de la atmósfera día y noche en todo el mundo.

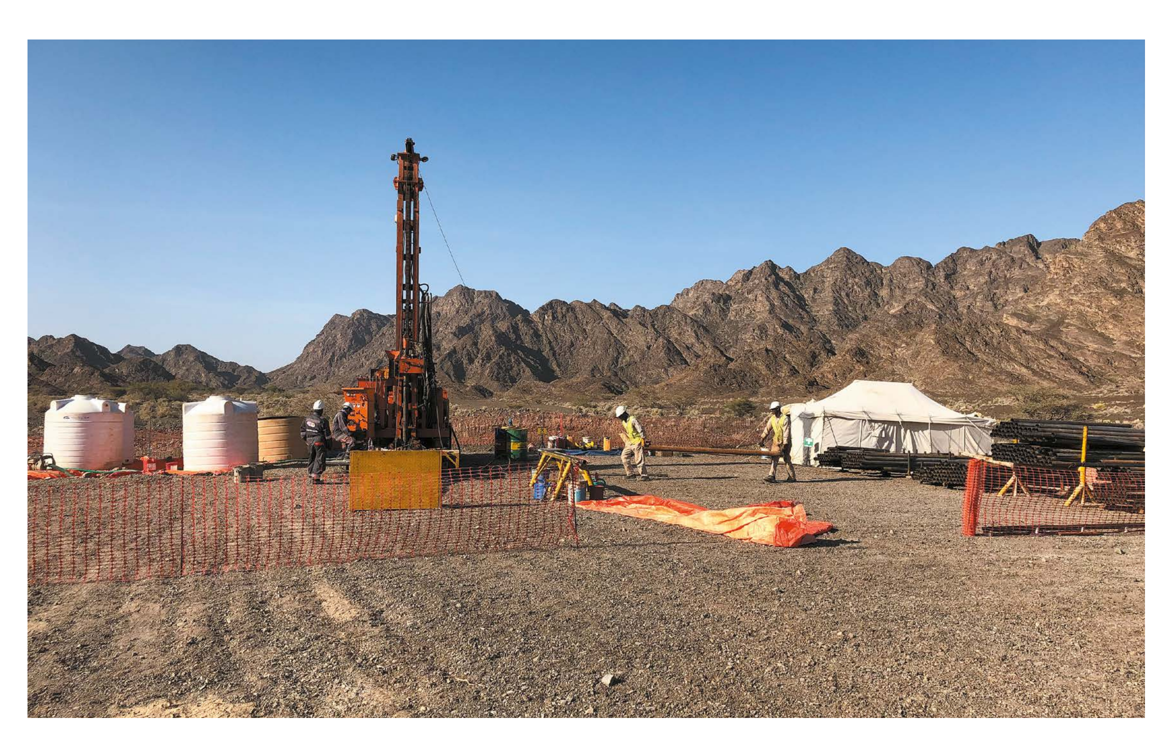
Hay que confinar de forma permanente el gas capturado, y se han probado varios métodos. En el yacimiento de gas Sleipner, frente a las costas noruegas, el CO_2 contenido en el gas natural se reinyecta en las rocas sedimentarias (depósitos de materiales granulares como la arenisca) situadas un kilómetro por debajo del lecho marino. El proyecto se inició en 1996 y almacena en torno a un millón de toneladas de CO_2 al año. El problema es que el CO_2 apenas reacciona con las rocas sedimentarias y se filtra a través de sus poros, por lo que algunos científicos temen que pueda ir escapando poco a poco.

En los noventa, Kelemen seguía otra línea de investigación y acampaba durante semanas en los remotos valles de Omán, lla-



PÁGINAS ANTERIORES: JUERG M. MATTER; EN ESTA PÁGINA: PETER KELEMEN

LA PERIDOTITA, una roca oscura muy abundante en el manto, reacciona con el dióxido de carbono atmosférico disuelto en el agua de lluvia cuando esta se filtra a través de las grietas. Como resultado, se forman vetas blancas de carbonatos minerales.





mados *wadis*, para cartografiar los conductos fosilizados que en su día llevaron magma desde las capas más profundas y calientes del manto hasta la superficie. Allí se solidificó en forma de basalto, una roca dura, densa y oscura que también compone gran parte de la corteza oceánica. Pero en 2004, Kelemen se trasladó del Instituto Oceanográfico de Woods Hole, en Massachusetts, al Observatorio Lamont-Doherty y conoció al geoquímico Juerg M. Matter (hoy en la Universidad de Southampton) y al físico Klaus S. Lackner (actual director del Centro de Emisiones Negativas de Carbono en la Universidad Estatal de Arizona). Lackner y Matter estudiaban si era posible inyectar CO_2 en rocas con un alto contenido en magnesio y calcio, que son más reactivas que las sedimentarias y convertirían el gas en minerales sólidos a través de la «carbonatación mineral».

La peridotita del manto de Omán contiene grandes cantidades de magnesio y calcio en forma de dos abundantes minerales: olivino y piroxeno. Estas rocas están surcadas por vetas de carbonato, lo que demuestra que en el pasado absorbieron CO_2. Pero algunos investigadores daban por sentado que ese proceso duró millones de años. Kelemen nunca había pensado demasiado en la eliminación del carbono, pero le costaba creer que las reacciones fueran tan lentas. Mientras trabajaba en Omán, había pasado muchas veces junto a un manantial alcalino en el valle de Khafifah. El agua que borboteaba del suelo estaba tan saturada de calcio que reaccionaba sin cesar con el CO_2 del aire, creando una capa lisa, nacarada y muy fina de calcita (carbonato de calcio) en la superficie de las pozas. Kelemen se percató de que, cuando el viento o la lluvia destruían la película de calcita, se formaba una nueva en 24 horas. «Para un geólogo, algo que sucede en un día es supersónico», subraya.

Esa rápida reacción en la superficie llevó a Kelemen a preguntarse si las vetas también podrían formarse bajo tierra más deprisa de lo esperado. En 2007 regresó a Omán y recogió con sus estudiantes muestras de las vetas de carbonato. De vuelta a casa, dataron los minerales. «Creía que esas vetas tendrían 90 millones de años», admite Kelemen, «pero ninguna llegaba a 50.000». Algunas eran de hace apenas 6000 años. Las rocas del manto



DOUGLAS FOX (*perforación*); MAPPING SPECIALISTS (*mapa*)

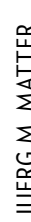
de Omán no solo habían absorbido CO_2 en el pasado remoto, sino que seguían haciéndolo, y quizá 10.000 veces más rápido de lo que había imaginado Kelemen.

En 2008, durante otra visita, Kelemen y Matter calcularon que los minerales representaban en torno al 1 por ciento del volumen de las rocas próximas a la superficie. Si fuera así, en toda la región se solidificarían de forma natural de 10.000 a 100.000 toneladas de CO_2 al año, lo que corresponde a las emisiones de entre unos 2000 y 20.000 coches. Eso apenas haría mella en el cambio climático, pero les hizo plantearse si podrían acelerar el proceso tanto como para obtener efectos globales.

Los dos investigadores viajaron a Omán cada año de los cuatro siguientes. Tomaron muestras de agua de los pozos para



UNA BARRENA HUECA perfora poco a poco la roca del manto (*izquierda*) y extrae un testigo cilíndrico. Los investigadores disponen esas secciones de manera ordenada (*derecha*) para determinar la profundidad a la que penetra el agua y la cantidad de dióxido de carbono que se mineraliza.



estudiar las reacciones químicas que acontecían bajo tierra. Sus resultados sugerían que, cuando el agua de lluvia penetra a través de las grietas del suelo, el CO_2 disuelto en ella se combina con los átomos de magnesio y crea vetas de carbonato de magnesio. Así, la pequeña cantidad de gas presente en el agua se agota enseguida. Entretanto, el calcio de la misma peridotita se disuelve y acumula en el agua a medida que esta se desplaza. Dedujeron que esa agua rica en calcio acababa rebrotando en manantiales como el de Khafifah. Allí reacciona con el CO_2 del aire y genera las películas de calcita que había visto Kelemen, así como vastas terrazas escalonadas de travertino (una roca de calcita) que hay diseminadas por toda la región.

Kelemen y Matter aún ignoraban hasta qué punto se podría acelerar el proceso, lo cual dependería de la profundidad y la velocidad a la que circulara el agua. Para dilucidar la cuestión, debían mirar bajo la superficie.

AGUAS PROFUNDAS

Una tarde cálida y despejada de enero de 2018, presencié cómo Kelemen y Matter echaban un vistazo crucial al interior de las rocas de Wadi Lawayni. Una barrena montada en la parte trasera de un voluminoso camión giraba y taladraba el suelo del valle, mientras los camellos mordisqueaban los arbustos sin prestar atención al estruendo.

Un cable había extraído ya nueve metros de roca del pozo de perforación. Los testigos, de un par de metros de largo y con un diámetro similar al de un bate de béisbol, yacían ordenados sobre mesas plegables y media docena de científicos los examinaban. «En los primeros metros pasan muchas cosas», comentó Kelemen, mientras se movía con determinación de una mesa a otra. El color de la roca variaba de forma apreciable incluso para esos cambios de profundidad relativamente pequeños.

Mientras aún estaban a grandes profundidades, las rocas del manto debían ser de color verde oscuro, puesto que los minerales olivino y piroxeno, ricos en magnesio y calcio, se formaron a más de 1300 grados Celsius y en ausencia total de oxígeno, agua y CO_2. Sin embargo, para cuando la tectónica y la erosión llevaron las rocas a la superficie, los minerales ya habían sufrido varias tandas de reacciones químicas. Los tonos anaranjados de los primeros metros de roca indicaban que el oxígeno transportado por el agua se había unido al hierro de los minerales y los había oxidado. Un poco más abajo, esos colores desaparecían porque al agua que había penetrado hasta allí ya no le quedaba oxígeno. A esa profundidad, la roca gris presentaba innumerables vetas finísimas de color turquesa, de un mineral llamado serpentina que se forma cuando las moléculas de agua se combinan con los átomos de magnesio y hierro. (Ese proceso genera el hidrógeno gaseoso que burbujea en las aguas subterráneas.)

Sobre ese telón de fondo se entrecruzaban vetas blancas de carbonato, fruto de la unión del CO_2 con el magnesio y el calcio. Las vetas empezaban tan anchas como un dedo, pero a 10 metros de profundidad eran escasas y finas, lo que denotaba que el agua también había perdido su CO_2 mientras descendía.

Conforme avanzaba la perforación, los operarios empaquetaban los testigos para dejar espacio a decenas de nuevos trozos, que colmaban las mesas como en un mercadillo de cilindros de piedra. A 400 metros de la superficie, las rocas seguían atravesadas por delgadas vetas de serpentina. Eso confirmaba que el agua se había filtrado al menos hasta allí.

Durante los tres años siguientes, los científicos siguieron realizando análisis en sus laboratorios para determinar la velocidad a la que reaccionaban las rocas con el CO_2 y el agua. Entre 2020 y principios de 2021, hablé en varias ocasiones con Matter, que estaba intrigado por un patrón observado en todos los núcleos: «No hay nada de carbonato en vetas o fracturas por debajo de los 100 metros», me explicó. Por alguna razón, el CO_2 no conseguía penetrar más en la roca.

Los estudios recientes del equipo sugieren una posible explicación. En un artículo de 2019, Kelemen y sus colaboradores, entre ellos Matter y su exalumna Amelia Paukert Vankeuren, ahora en la Universidad Estatal de California en Sacramento, calcularon que el agua subterránea presente en los primeros 50 metros de las perforaciones llevaba allí entre 4 y 40 años; esa agua provenía de las lluvias. Sin embargo, en las rocas más profundas, el agua había estado al menos 20.000 años bajo tierra. En otro trabajo publicado en 2020, Matter y Gérard Lods, de la Universidad de Montpellier, bombearon agua entre dos pozos profundos separados por 15 metros para determinar si circulaba sin problemas. Comprobaron que fluía con relativa facilidad en las capas superiores, pero por debajo de 100 metros la permeabilidad se hacía 1000 veces menor.

Esos hallazgos muestran que la velocidad de la carbonatación mineral en Omán se ve limitada por un importante cuello de botella: el agua de lluvia solo se adentra 100 metros en las rocas del manto. Pero el espesor medio de esas rocas es de unos tres kilómetros. «Eso indica que el potencial para la carbonatación a mayor profundidad es enorme», señala Matter. Siempre, claro está, que el agua lograra llegar hasta allí y atravesar las rocas con rapidez para aportar un suministro constante de CO_2.

Para eliminar ese cuello de botella, los equipos de captura directa, que disponen de ventiladores que hacen pasar el aire a través de absorbentes químicos, extraerían y concentrarían

el CO_2 atmosférico. Otras máquinas presurizarían el gas y lo harían descender por un pozo de perforación. A profundidades de entre 1000 y 3000 metros, el gas se disolvería en agua (inyectada por una tubería independiente) y la mezcla se liberaría en las rocas del manto circundantes. El agua se filtraría a través de los poros de la roca y acabaría alcanzando un segundo pozo situado a una distancia de hasta 1000 metros. Este actuaría como una «chimenea de retorno», devolviendo a la superficie el agua despojada de CO_2 para su reutilización.

A tres kilómetros de profundidad, las rocas rondan los 100 grados Celsius, y esa temperatura elevada favorecería las reacciones. Además, el calor que generan estas ayudaría a impulsar el agua caliente hacia la superficie a través de las chimeneas.

En 2020, Kelemen y Paukert Vankeuren publicaron cálculos que sugieren que bombear agua con concentraciones moderadamente altas de CO_2 hasta una profundidad de tres kilómetros podría acelerar la mineralización varios miles de veces. A ese ritmo, un solo pozo de inyección podría capturar 50.000 toneladas de CO_2 al año (una cantidad similar a la que se absorbe de forma natural en todo Omán) bajo un terreno con el área de unos nueve campos de fútbol. En diez años, ese pozo eliminaría medio millón de toneladas de CO_2.

Los científicos que extrajeron los testigos en Wadi Lawayni no intentaron inyectar CO_2 en las rocas del manto. Pero unos años antes ya se había hecho en Islandia, en otro tipo de roca con una composición similar. El éxito de ese proyecto allanó el camino para lo que está a punto de suceder en Omán.

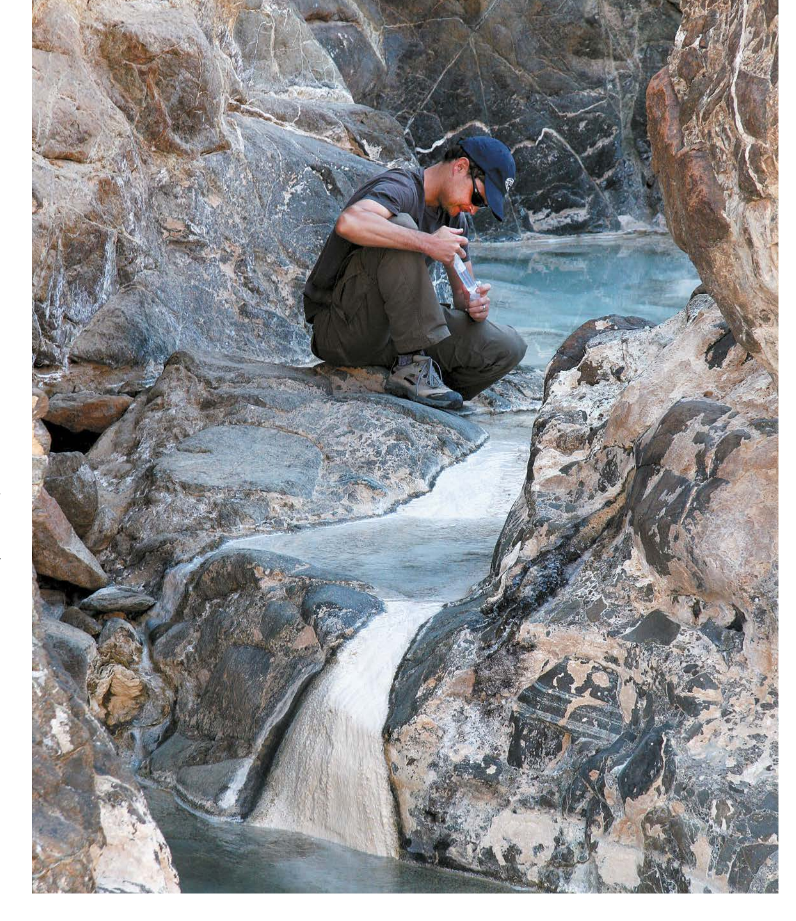
FRACTURACIÓN NATURAL

A cientos de kilómetros bajo el Atlántico Norte, entre Groenlandia y Noruega, hay un foco caliente en el manto. El calor procedente del núcleo de la Tierra ablanda la roca, y el magma parcialmente fundido asciende al lecho marino a través de las grietas. Durante 50 millones de años, ese magma se solidificó en forma de basalto, en una meseta que se fue elevando hasta emerger del océano y convertirse en la actual Islandia. El basalto contiene menos magnesio y calcio que su roca madre, pero más que la mayoría de los minerales presentes en la superficie.

Para 2005, Matter, Lackner y Wallace Broecker, del Observatorio Lamont-Doherty, ya estaban convencidos de que esos basaltos ofrecían una buena oportunidad de mineralizar el CO_2. Broecker, que falleció en 2019, colaboró con la compañía eléctrica Reykjavik Energy para iniciar un experimento de inyección de CO_2 denominado Carbfix en la central geotérmica islandesa de Hellisheidi. A partir de 2012, procesaron los gases emitidos por la planta para extraer el CO_2 y el sulfuro de hidrógeno (productos naturales de los yacimientos geotérmicos) y reinyectarlos en el basalto a través de pozos de entre 400 y 800 metros.

Durante ocho meses, los ingenieros inyectaron unas 250 toneladas de CO_2. El control de los pozos cercanos demostró que el 95 por ciento del gas quedaba atrapado en carbonatos minerales en menos de dos años. El proyecto, que lleva funcionando desde entonces, almacena unas 10.000 toneladas anuales de CO_2. En 2019, Carbfix se escindió y se convirtió en una compañía independiente, cuyo objetivo es secuestrar mil millones de toneladas de CO_2 en el basalto para el año 2030.

Matter, que ayudó a dirigir el experimento, considera que sus resultados suponen una importante validación. Al principio, rememora, «los expertos en captura de carbono nos tomaban por locos» porque se creía que el basalto no era lo bastante poroso para que el agua circulara a través de él. Desde entonces, otro equipo del Laboratorio Nacional del Noroeste del Pacífico también ha conseguido mineralizar CO_2 en rocas basálticas, en la Demostración Piloto en Basalto de Wallula.



PETER KELEMEN

Las rocas del manto podrían ser mejor opción que los basaltos, ya que poseen una cantidad tres veces mayor de magnesio y calcio reactivos. Una tonelada de peridotita del manto podría solidificar hasta 500 kilogramos de CO_2, frente a los 170 kilogramos de una tonelada de basalto.

Pero no todos los expertos piensan que las rocas del manto o los basaltos sean la mejor solución. Según Christopher Zahasky, hidrogeólogo de la Universidad de Wisconsin-Madison, inyectar CO_2 en las rocas sedimentarias es seguro a pesar de que el gas pueda migrar, porque intensas fuerzas capilares lo atrapan en los diminutos espacios que hay entre los granos minerales. Aunque se fracture la roca, no es probable que el gas escape.

Con todo, Zahasky ve una ventaja importante en el almacenamiento de CO_2 en basaltos y rocas del manto: «Es más fácil de explicar y vender». La reflexión no es baladí, ya que los proyectos a gran escala seguramente precisarán un fuerte respaldo de la opinión pública. Y en regiones como Omán, la India o el noroeste del Pacífico estadounidense, los depósitos sedimentarios idóneos podrían ser menos abundantes que los basaltos o las rocas del manto. Para resolver el problema del carbono, apunta Zahasky, «debemos contemplar todas las opciones».

El reto que plantean las rocas del manto es que poseen menos espacio poroso que las sedimentarias, explica Zahasky, de modo que «se necesitan más pozos para distribuir un fluido en el subsuelo de manera uniforme». Kelemen lleva años rumiando este problema y cree tener una solución: si la inyección se realiza correctamente, las propias reacciones químicas podrían fracturar las rocas y permitir el paso del agua.

Cuando estuve en Omán, Kelemen me llevó por una estrecha rambla. Nos detuvimos junto a una roca redondeada del tamaño de un coche, repleta de vetas de carbonato. Algunos bloques de roca que antes encajaban a la perfección ahora aparecían inclinados y separados caprichosamente por la intromisión de las

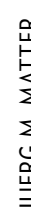
JUERG MATTER (*izquierda*) analiza aguas subterráneas tan saturadas de calcio que reaccionan con el dióxido de carbono del aire y forman películas blancas de calcita en la superficie (*arriba*). La calcita también puede acumularse sobre las rocas.

vetas, como un edificio en ruinas donde el mortero se hubiera expandido sin freno entre los ladrillos. «Al mirar este afloramiento, casi puedo oírlo explotar», compartió Kelemen.

Esa «explosión» figurada tuvo lugar a cámara lenta, mientras las rocas aún estaban bajo tierra. Cuando el CO_2 se une al magnesio o al calcio para formar carbonatos, el nuevo mineral pasa a ocupar un volumen entre un 20 y un 60 por ciento mayor. Según el modelo de Kelemen, al crecer, los carbonatos pueden ejercer presiones de hasta 2900 atmósferas sobre la roca circundante. Así, la conversión química de las rocas del manto debería fracturarlas, produciendo grietas cada vez más anchas y profundas. Eso dejaría expuestas nuevas superficies reactivas y permitiría la entrada de más agua y CO_2.

Matter y Robert Sohn, geofísico del Instituto de Woods Hole, hallaron indicios de esa fracturación durante dos viajes a Wadi Lawayni, en 2019 y 2020. Introdujeron hidrófonos en varios pozos llenos de agua que quedaron tras las perforaciones y pusieron sismómetros en torno a los agujeros. En un mes, registraron cientos de microterremotos demasiado débiles para que los sintiera una persona. «Un agrietamiento causado por la reacción generaría esas señales tan características», explica Sohn, «y los datos estaban llenos de ellas». Sin embargo, advierte que eso no constituye una prueba concluyente.

Aunque los ingenieros averiguaran cómo aprovechar la expansión y el agrietamiento, tendrían que considerar consecuencias imprevistas. Un cálculo aproximado sugiere que atrapar mil millones de toneladas de CO_2 en forma de carbonatos podría aumentar el volumen de la roca hasta en una décima de kilómetro cúbico, lo que equivale a unos 35 edificios como el Empire State. Si esa expansión se repartiera entre las rocas situadas bajo un área de 300 kilómetros cuadrados (como sucedería en uno de los escenarios de Kelemen), la mineralización de mil millones de toneladas de CO_2 al año podría provocar una elevación anual del terreno de hasta 30 centímetros.



Si se inyectaran solo un millón de toneladas anuales de CO_2, el ascenso del terreno sería de apenas un milímetro al año, menor del que registran muchas regiones como resultado de las fuerzas tectónicas. La expansión solo se volvería problemática a escalas muy grandes. Para lidiar con esta dificultad, Kelemen opina que cualquier inyección del orden de las gigatoneladas debería realizarse cerca de las costas del golfo de Omán, donde los ingenieros podrían perforar en diagonal hasta alcanzar las rocas del manto que yacen bajo el lecho marino poco profundo. En ese caso, cualquier abultamiento seguramente ocurriría en el fondo marino y sería inocuo. Además, esa ubicación proporcionaría abundante agua de mar para transportar el CO_2 concentrado, algo importante en una nación desértica donde las aguas subterráneas tienden a escasear.

Está claro que aún quedan cuestiones por resolver antes de que las rocas del manto puedan empezar a contrarrestar las emisiones de CO_2. Pero están a punto de abordarse.

REDUCIR COSTES

Una empresa con sede en Omán llamada 44.01 (por la masa molecular media del CO_2) ha obtenido permiso del Gobierno para realizar la primera prueba piloto del mundo de carbonatación mineral en rocas del manto. La compañía tenía previsto empezar a trasladar el equipo a Wadi Lawayni en mayo o junio de 2021. Unas semanas más tarde, empezarían a inyectar agua dulce con CO_2 y un marcador químico inerte en un pozo de perforación cercano al que visité en 2018. Los investigadores medirían la concentración del marcador, del CO_2 y de los minerales disueltos en un segundo pozo situado a unos 100 metros, para determinar cómo de rápido se desplaza el agua a través de la roca y cuánto



UN GRAN PUERTO da servicio a Mascate, la capital de Omán. Capturar miles de millones de toneladas de dióxido de carbono atmosférico, concentrarlo en el agua e inyectarlo en el subsuelo para su mineralización requeriría una gran infraestructura industrial.

CO_2 pierde. Kelemen y Matter asesoran a la empresa. Si este experimento demuestra que el CO_2 se mineraliza deprisa (un dato que el fundador de 44.01, Talal Hasan, debería conocer en unos cuatro meses), la empresa tiene previsto iniciar su primera operación de inyección comercial en 2022. Emplearía agua dulce, o tal vez aguas residuales tratadas, para enviar 10.000 toneladas de gas al año a través de un único pozo, con la esperanza de alcanzar las 100.000 toneladas anuales en un futuro. También contemplan realizar una segunda prueba piloto más cerca de la costa, esta vez con agua de mar.

Hasan es un emprendedor y concibe 44.01 como una empresa de carbonatación mineral que prestaría servicios a compañías como la suiza Climeworks o la canadiense Carbon Engineering, que harían funcionar sus equipos de captura directa del aire en Omán. El CO_2 emitido a la atmósfera desde cualquier punto de la Tierra circula alrededor del planeta, por lo que el gas se puede capturar y eliminar donde resulte más conveniente, y Omán podría convertirse en un importante centro mundial.

Hasan cree que, con el tiempo, 44.01 conseguirá mineralizar 1300 millones de toneladas de CO_2 al año en Omán, una parte importante de los entre 2000 y 20.000 millones de toneladas anuales de CO_2 que debemos retirar de la atmósfera para no superar los 1,5 grados Celsius de calentamiento. En la actualidad, 44.01 es la única empresa que apuesta por inyectar CO_2 en las rocas del manto, pero un informe de 2019 de la Academia Nacional de Ciencias de EE.UU. estima que las formaciones del manto podrían almacenar más de 10.000 millones de toneladas anuales en todo el mundo. Los proyectos que emplean basalto, como Carbfix, ampliarían esa capacidad.

Secuestrar mil millones de toneladas de CO_2 al año en Omán requeriría una enorme infraestructura. Según los cálculos de Kelemen, concentrando el gas hasta alcanzar niveles 440 veces superiores a los que se dan de forma natural en el agua de mar (una cifra al alcance de los equipos de captura del aire actuales), harían falta 5000 pozos de inyección. En conjunto, bombearían 23 kilómetros cúbicos de agua al año, lo que representa alrededor del 4 por ciento del caudal del río Misisipi. La magnitud de esa operación puede resultar sorprendente, pero la emergencia climática exige una intervención colosal. Y, aun así, seguiría siendo minúscula en comparación con las infraestructuras dedicadas a la extracción de combustibles fósiles: solo en EE.UU. hay más de un millón de pozos de petróleo y gas. Por supuesto, dependería de la humanidad aprovechar la coyuntura para completar la transición a las energías renovables, en vez de verla como una licencia para emitir aún más carbono.

El coste será un factor determinante. En Islandia, Carbfix mineraliza el CO_2 por unos 25 dólares la tonelada. (44.01 no ha notificado ninguna estimación oficial del coste.) Esa cifra se sitúa en el mismo rango de precios de otras estrategias que no almacenan el carbono de una forma tan permanente, como la reforestación y la gestión de las tierras de cultivo, de acuerdo con un informe que un grupo internacional de científicos publicó en 2018 en *Environmental Research Letters*.

El verdadero reto estriba en capturar y concentrar el CO_2 antes de inyectarlo. Jennifer Wilcox, colaboradora de Kelemen y subsecretaria adjunta principal en la Oficina de Energías Fósiles de EE.UU., y su estudiante de doctorado Noah McQueen, de la Universidad de Pensilvania, han creado un marco para estimar el coste combinado de esas operaciones. Sus cálculos, que incluyen los salarios de los trabajadores y los gastos de construcción y mantenimiento de los equipos durante 20 años, arrojan un coste aproximado de entre 120 y 220 dólares por tonelada de CO_2 retirada de la atmósfera. La captura directa del aire requiere mucha energía y «si se opta por usar combustibles fósiles, hay que considerar el coste de gestionar el carbono que generan», apunta Wilcox. La técnica aún es reciente, destaca Ajay Gambhir, economista climático del Colegio Imperial de Londres, y las innovaciones podrían abaratar los costes. Estos podrían reducirse a la cuarta parte, si los equipos siguen la misma trayectoria que las turbinas eólicas en la última década. Pero «no lo sabremos con seguridad hasta que la técnica se aplique a gran escala», añade Gambhir.

No es probable que muchos emisores paguen por la captura directa del aire y la carbonatación mineral hasta que los



Gobiernos establezcan un precio para las emisiones de gases de efecto invernadero [*véase* «El precio de contaminar», por Gilbert E. Metcalf; Investigación y Ciencia, agosto de 2020]. Según Gregory Nemet, investigador de políticas energéticas de la Universidad de Wisconsin-Madison, aunque los países industrializados suelen gravar el carbono con menos de 50 dólares por tonelada de CO_2, una norma de California sobre los combustibles fósiles está llevando a las empresas a invertir hasta 200 dólares por tonelada en derechos de emisión, y cabe esperar que los precios vayan subiendo. Esa cifra abre las puertas a una colaboración entre una compañía de mineralización como 44.01 y otra especializada en captura directa del aire para emprender una pequeña operación conjunta. La demanda de esos servicios podría aumentar a medida que más Gobiernos le pongan precio al carbono. «No hace falta que procesen gigatoneladas [de CO_2] para 2025», matiza Nemet. «Lo que necesitan es una serie de instalaciones cada vez más grandes, que les permitan aprender y mejorar para ir reduciendo los costes.»

Omán es una ubicación atractiva, y no solo por la geología. Su potente industria de combustibles fósiles tiene experiencia en el manejo de gases a presión, y la luz solar es intensa durante todo el año. Un proyecto para capturar mil millones de toneladas anuales de gas precisaría una energía de entre 700.000 millones y 1,3 billones de kilovatios hora, de acuerdo con los cálculos de McQueen. Las fórmulas habituales basadas en la intensidad de la luz muestran que esa energía se podría generar con conjuntos de placas solares que ocuparan de 300 a 600 kilómetros cuadrados, menos del 0,2 por ciento de la superficie de Omán.

El país también es famoso por sus espectaculares costas, cañones, fortalezas medievales y mezquitas, que atraen a millones de turistas cada año. Y es hogar de una población beduina que lleva a cabo migraciones estacionales. Hay que proteger ese frágil patrimonio, pero Omán (y la península arábiga en su conjunto) posee abundantes tierras áridas y vacías que podrían albergar una floreciente industria de emisiones negativas.

Los científicos tienen otras ideas para usar las rocas del manto. Algunos proponen extraerlas, triturarlas para aumentar su superficie y extenderlas a lo largo de miles de kilómetros cuadrados de desierto, donde absorberían el CO_2 de forma natural. Cada año se recogerían, se someterían a un tratamiento térmico para expulsar el CO_2 y volverían a esparcirse. Habría que eliminar el CO_2 de algún modo (seguramente inyectándolo en otras formaciones rocosas) o usarlo como materia prima para fabricar plásticos o combustibles sintéticos. Otra opción sería depositar la roca en las tierras de cultivo y dejarla allí, donde absorbería el CO_2 y mejoraría la calidad del suelo. En cualquier caso, extraer, machacar y transportar la piedra podría afectar al paisaje y consumir grandes cantidades de energía. Al menos en Omán, la modesta propuesta de Kelemen de perforar 5000 pozos de inyección se antoja menos extrema. Los pozos podrían situarse en zonas costeras que ya alberguen operaciones industriales y no perturbarían el paisaje más que un parque eólico. Por su parte, los paneles solares se instalarían tierra adentro, en parcelas cuidadosamente elegidas.

Por ahora, Kelemen se contenta con ver un primer paso: la prueba de campo en Wadi Lawayni. Ha recorrido un largo viaje desde su indiferente curiosidad de principios de siglo hasta el entusiasmo actual, y ya mira al futuro y piensa en maneras de reducir la huella física de la carbonatación mineral. Una tarde de 2018 me llevó a trepar un cañón. Bajo la tenue luz del atardecer, se detuvo y señaló una cumbre rojiza a nuestra derecha. «En esa montaña hay mil millones de toneladas de CO_2», me dijo. En todo Omán, las vetas de carbonato suponen solo el 1 por ciento del volumen de roca superficial, pero en ese pequeño monte, observó Kelemen, «todos y cada uno de los átomos de magnesio y de calcio se combinan con el CO_2 para formar carbonatos».

Esas rocas surgieron a partir de los mismos minerales del manto que encontramos en cualquier lugar. Pero reaccionaron con el CO_2 y el agua hace más tiempo, cuando aún se hallaban a gran profundidad y, por lo tanto, muy calientes. (El agua y el CO_2 procedían de una zona de subducción cercana, donde los sedimentos oceánicos se «cocinaban a presión» mientras se hundían en el manto.) A partir de análisis geoquímicos publicados en 2020, Kelemen cree que las rocas quizá estuvieran a unos 250 grados Celsius cuando mineralizaron el CO_2. Es una temperatura suficiente para que aparezcan grietas, así que cada pedazo de roca pudo participar en la reacción.

Hoy en día, muchas de las rocas del manto de Omán están así de calientes, pero se hallan a cinco o seis kilómetros de la superficie. Alcanzarlas requeriría una perforación más compleja, pero que podría ser económicamente viable si los estudios piloto salen bien, asegura Hasan.

Al fin y al cabo, la industria de las emisiones negativas aún está arrancando, en la misma fase en la que estaba la extracción de petróleo a mediados del siglo xix, cuando se veía eclipsada por la potente industria del aceite de ballena. Los primeros pozos petrolíferos apenas tenían unos metros de profundidad. Poco a poco, las compañías fueron internándose más en la tierra en busca de premios mayores. Eso fue posible gracias a una tecnología de perforación más avanzada; una floreciente infraestructura mundial para recoger, transportar y vender el preciado producto; y una creciente desesperación por conseguir más. Esos mismos estímulos podrían impulsarnos algún día a seguir profundizando en busca de otro recurso: rocas calientes para solidificar el CO_2. Omán, un país que ha ganado miles de millones de dólares vendiendo hidrocarburos enterrados, podría emprender una inteligente transición que le reporte miles de millones más por volver a soterrar ese mismo carbono. IyC

PARA SABER MÁS

In situ carbonation of peridotite for CO2 storage. Peter B. Kelemen y Juerg M. Matter en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 105, págs. 17295-17300, noviembre de 2008

Permanent storage of carbon dioxide in geological reservoirs by mineral carbonation. Juerg M. Matter y Peter B. Kelemen en *Nature Geoscience*, vol. 2, págs. 837-841, diciembre de 2009.

Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions. Juerg M. Matter et al. en *Science*, vol. 352, págs. 1312-1314, junio de 2016.

Multitracer determination of apparent groundwater ages in peridotite aquifers within the Samail ophiolite, Sultanate of Oman. Amelia N. Paukert Vankeuren et al. en *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 516, págs. 37-48, junio de 2019.

Carbon dioxide storage through mineral carbonation. Sandra Ó. Snæbjörnsdóttir et al. en *Nature Reviews Earth & Environment*, vol. 1, págs. 90-102, febrero de 2020.

Groundwater flow characterization of an ophiolitic hard-rock aquifer from cross-borehole multi-level hydraulic experiments. Gérard Lods et al. en *Journal of Hydrology*, vol. 589, art. 125152, octubre de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Limpiar de carbono el aire. Klaus S. Lackner en *IyC*, agosto de 2010.

La falacia de la captura de carbono. David Biello en *IyC*, marzo de 2016.

El último recurso. Richard Conniff en *IyC*, marzo de 2019.

La encrucijada de la biomasa. Eric Toensmeier y Dennis Garrity en *IyC*, octubre de 2020.

BIOLOGÍA

La sed h

Por qué el agua ha sido un factor determinante en nuestra historia evolutiva

Asher Y. Rosinger


umana

Asher Y. Rosinger es experto en biología humana. Trabaja en la Universidad Estatal de Pensilvania, donde estudia las variaciones en el consumo humano de agua y su relación con los recursos ambientales y la salud.

Avanzábamos a paso lento por la Amazonia boliviana, bañados en sudor. Cubiertos de la cabeza a los pies por trajes protectores contra insectos, íbamos un paso por delante de las nubes de mosquitos mientras esquivábamos raíces, lianas y hormigas gigantes. Mi ayudante de investigación local, Dino Nate, mi pareja, Kelly Rosinger, y yo seguíamos a Julio, uno de mis amigos chimanes y nuestro guía en esa ocasión. Los chimanes son una etnia de recolectores-horticultores que habita esa región calurosa y húmeda. Detrás de nosotros, el hijo de tres años de Julio se movía alegremente por la selva, ajeno al bochorno y a los insectos pese a no llevar ropa protectora, lo que ponía en evidencia mis sudorosos esfuerzos.

Nos detuvimos frente a lo que parecía un arbolillo, pero resultó ser un enorme bejuco. Julio nos contó que los chimanes recurren a esas plantas trepadoras cuando necesitan agua en la selva virgen. Comenzó a machetearlo en todas direcciones, haciendo saltar la corteza con cada golpe, y en menos de dos minutos había cortado un trozo de un metro de largo del que comenzó a brotar agua. Lo sostuvo sobre su boca y bebió durante unos segundos para calmar su sed, antes de pasármelo. Recogí un poco de agua con mi cantimplora. Sabía muy bien: ligera, con un punto terroso, casi carbonatada.

Como parte de mi trabajo de campo, les estaba preguntando a Julio y a otros chimanes cómo obtenían agua potable en distintos lugares: en sus casas, en los campos, en el río o en la selva. Julio me explicó que solo se usan dos tipos de bejucos para beber: los demás no sirven o son tóxicos. Pero cuando me señaló las otras especies, me resultó casi imposible diferenciarlas. Así pues, las plantas trepadoras constituyen una fuente de agua oculta, y las observaciones de Julio plantean una cuestión fundamental sobre la adaptación de los seres humanos: ¿cómo determinó nuestra historia evolutiva las estrategias que empleamos para satisfacer nuestra necesidad de agua, en especial en lugares sin acceso directo al agua potable?

En la selva el agua es bastante abundante, pero incluso cuando nos alejábamos de los arroyos, Julio sabía exactamente dónde y cómo encontrarla. Los humanos no somos los únicos que vamos tomando nota de las fuentes naturales de agua: muchos animales trazan mapas mentales de sus inmediaciones para recordar dónde están los recursos importantes, y algunos llegan a modificar el entorno para obtener agua. Pero sí nos distinguimos por adoptar medidas mucho más extremas.

A lo largo de la historia, hemos ejecutado portentosas obras de ingeniería para asegurarnos el suministro de agua. Fijémonos en la antigua urbe romana de Cesarea Marítima, en lo que hoy es Israel. Cuando se construyó, hace más de 2000 años, la región no contaba con suficiente agua dulce para sustentar una ciudad. Dada la importancia geográfica que tenía para su dominio colonial, los romanos se sirvieron de mano de obra esclava para erigir una serie de acueductos que conectaban con manantiales situados a varios kilómetros. Ese sistema proporcionaba unos 145 litros de agua por persona y día a una población de hasta 50.000 habitantes.

Hoy en día, las ciudades cuentan con extensas redes de distribución de agua potable, lo cual ha propiciado mejoras espectaculares en la salud pública. Cuando tenemos agua de sobra se nos olvida lo imprescindible que es, pero cuando se convierte en un bien escaso, no pensamos en otra cosa. Basta la noticia de un corte en la red o un caso de contaminación para que comencemos a preocuparnos por la disponibilidad de agua.

Si no bebemos suficiente, nuestras funciones físicas y cognitivas se resienten. Si no bebemos nada, morimos en cuestión de días. De este modo, los humanos dependemos más del agua que muchos otros mamíferos. Investigaciones recientes han arrojado luz sobre el origen de nuestra necesidad de agua y sobre el modo en que nuestros ancestros se adaptaron para saciar esa sed. Y resulta que el agua ha marcado la evolución humana tanto como los alimentos sólidos.

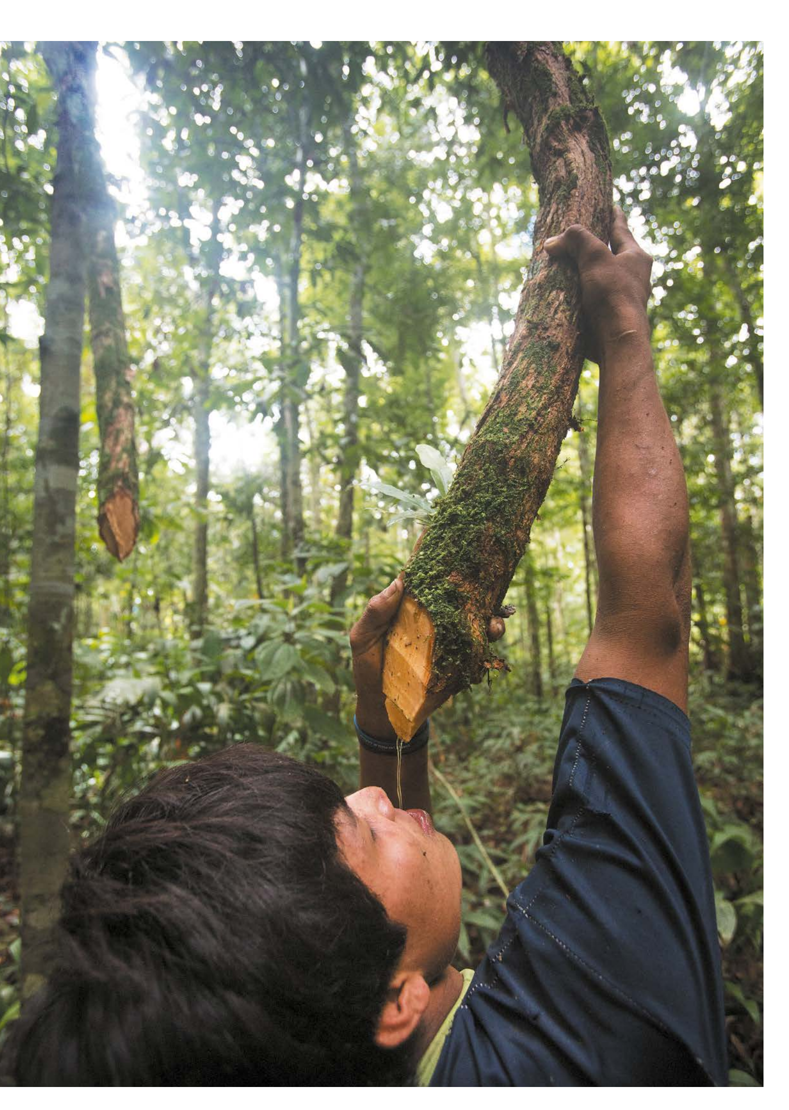
EN SÍNTESIS

A lo largo de la evolución, hemos experimentado varios cambios anatómicos y fisiológicos que nos permiten regular mejor la temperatura corporal, pero nos hacen más vulnerables a la deshidratación.

Eso provoca que dependamos más del agua que otros mamíferos, y hemos desarrollado diversas estrategias para obtenerla, entre las que destaca nuestra flexibilidad alimentaria.

Con todo, la ingesta de agua varía mucho de una persona a otra. Es posible que algunas experiencias tempranas durante el desarrollo fetal y la lactancia determinen nuestras necesidades de agua.

PÁGINAS ANTERIORES: I AM A PHOTOGRAPHER AND AN ARTIST, GETTY IMAGES

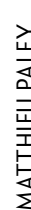


UN ADOLESCENTE CHIMÁN bebe agua de un bejuco en la Amazonia boliviana.

ROMPER A SUDAR

Para entender la influencia que ha tenido el agua en la evolución humana, debemos volver la mirada a un capítulo trascendental de nuestra prehistoria. Hace entre unos tres y dos millones de años, el clima de África, el lugar donde aparecieron los homininos (los miembros de la familia humana), se volvió más seco. En ese lapso de tiempo, el género *Australopithecus* dio paso a *Homo*, al que pertenecemos nosotros [*véase* «El origen del género *Homo*», por Kate Wong; Investigación y Ciencia, junio de 2012]. Esa transición cambió las proporciones anatómicas: los australopitecos eran bajos y fornidos, mientras que *Homo* tenía una complexión más alta y esbelta, con una mayor superficie corporal. Esas modificaciones redujeron la exposición a la radiación solar de nuestros antepasados y aumentaron su exposición al viento, lo que incrementó su capacidad para disipar el calor y su eficiencia con respecto al agua.

La transformación del diseño corporal vino acompañada de otras adaptaciones clave. A medida que el cambio climático reemplazaba los bosques por praderas y los primeros homininos aprendían a caminar erguidos por parajes abiertos, fueron perdiendo el vello corporal y desarrollaron más glándulas sudoríparas. Estas adaptaciones les permitieron deshacerse mejor del exceso de calor y mantener una temperatura corporal segura mientras se movían, como han demostrado los trabajos de Nina Jablonski, de la Universidad Estatal de Pensilvania, y Peter Wheeler, de la Universidad John Moores de Liverpool.



Las glándulas sudoríparas desempeñan un papel crucial en esta historia. Los mamíferos tenemos de tres tipos: apocrinas, sebáceas y ecrinas. Las glándulas ecrinas movilizan el agua y los electrolitos contenidos en las células para producir el sudor, y los humanos poseemos más que ningún otro primate. En un estudio reciente, un equipo liderado por Daniel Aldea, de la Universidad de Pensilvania, concluyó que esta abundancia de glándulas sudoríparas ecrinas podría deberse a mutaciones repetidas del gen *engrailed 1 (EN1)*. En entornos relativamente secos, semejantes a los que habitaron los primeros homininos, la evaporación del sudor refresca la piel y los vasos sanguíneos, que, a su vez, regulan la temperatura del cuerpo.

Armados con este potente sistema de refrigeración, los primeros humanos pudieron permitirse ser más activos que otros primates. De hecho, algunos investigadores defienden la importancia de la caza por persistencia (que consiste en perseguir a un animal hasta que caiga extenuado por el calor) en la búsqueda de sustento de nuestros ancestros, y esa es una técnica que no habrían podido emplear si no hubieran dispuesto de medios para evitar el sobrecalentamiento.

Sin embargo, esa mayor sudoración conlleva una desventaja: aumenta nuestro riesgo de deshidratarnos. Los resultados de Martin Hora, de la Universidad Carolina de Praga, y sus colaboradores demuestran que *Homo erectus* habría sido capaz de practicar la caza por persistencia durante unas cinco horas en la tórrida sabana africana antes de perder el 10 por ciento de su masa corporal por deshidratación. En el ser humano, ese suele ser el umbral a partir del cual existe un grave riesgo de sufrir problemas fisiológicos y cognitivos, o incluso la muerte. Superado ese punto, beber se torna difícil y es preciso reponer líquidos por vía intravenosa.

Nuestra vulnerabilidad a la deshidratación implica que dependemos más de las fuentes externas de agua que otros primates, y mucho más que los animales adaptados al desierto (como algunas ovejas, cabras y camellos), que pueden perder entre el 20 y el 40 por ciento del agua corporal sin riesgo de morir. Estos animales tienen una cámara adicional en el tubo digestivo, el rumen, donde pueden almacenar agua para prevenir la deshidratación.

De hecho, los mamíferos del desierto poseen toda una serie de adaptaciones para afrontar la escasez de agua. Algunas tienen que ver con la función renal, que mantiene el equilibrio hidrosalino del organismo. Los mamíferos poseen riñones de distintos tamaños y formas, lo cual influye en su capacidad de concentrar la orina y preservar el agua corporal. Por ejemplo, el ratón de abazones desértico puede pasar meses sin beber, en parte porque sus riñones producen una orina hiperconcentrada. Los humanos podemos imitarlo hasta cierto punto. Cuando perdemos grandes cantidades de líquido por la transpiración, una compleja red de hormonas y circuitos neuronales ordena a los riñones que ahorren agua y concentren la orina. Pero nuestra capacidad es limitada, así que podemos aguantar mucho menos tiempo sin agua que los ratones del desierto.

Tampoco tenemos depósitos de agua en el cuerpo. Los camellos del desierto pueden beber y almacenar agua suficiente para varias semanas. En cambio, si los humanos ingerimos mucho líquido, nuestra producción de orina aumenta enseguida. El tamaño de nuestro intestino y el ritmo al que se vacía el

estómago limitan la velocidad a la que podemos rehidratarnos. Peor aún: si bebemos demasiada agua demasiado rápido, podemos alterar nuestro equilibrio hidroelectrolítico y padecer hiponatremia (una concentración anormalmente baja de sodio en la sangre). Y ese trastorno es tan letal como la deshidratación, si no más.

Aun en condiciones favorables, con agua y alimentos a nuestra disposición, solemos tardar al menos 24 horas en recuperar todo el líquido perdido en una sesión de ejercicio físico intenso. Por eso, tenemos que procurar encontrar un equilibrio entre la pérdida y la reposición del agua corporal.



LOS MAMÍFEROS DEL DESIERTO, como los camellos, presentan diversas adaptaciones para hacer frente a la escasez de agua.

MLENNY, GETTY IMAGES

SACIAR NUESTRA SED

Cuando le pregunté a Julio por las fuentes de agua «ocultas», como los bejucos, que usaban los chimanes, tenía un buen motivo. Una noche de 2009, a las pocas semanas de llegar a Bolivia para mi primera sesión de trabajo de campo, la combinación de hambre y sed me llevó a devorar una enorme papaya. El jugo me chorreaba por el mentón mientras masticaba la fruta madura. En ese momento no lo pensé demasiado, pero al poco de introducirme en la mosquitera para pasar la noche, cobré conciencia de mi error.

En la Amazonia boliviana, la humedad nocturna puede alcanzar el 100 por cien. Cada noche, antes de acostarme, me quedaba en ropa interior, enrollaba bien el resto de prendas y las metía en grandes bolsas de plástico para no encontrármelas empapadas por la mañana. Tras pasar una hora en la mosquitera, rezando por alguna corriente de aire que me refrescara un poco, me invadió una sensación inoportuna: necesitaba orinar. Consciente del trabajo que supondría vestirme, ir al baño, y volver a guardar la ropa, maldije mi decisión de comerme la papaya. Y antes de que acabara la noche tuve que volver a repetir todo el proceso. Comencé a pensar en cuánta agua contenía esa fruta: unos tres cuartos de litro, al parecer. No es extraño que me entrasen ganas de orinar.

Puede que la flexibilidad alimentaria sea nuestra mejor defensa contra la deshidratación. Como aprendí por las malas durante aquella noche sofocante, los alimentos también contribuyen a nuestra ingesta total de agua, y de ellos procede alrededor del 20 por ciento del agua que consumen los estadounidenses. Pero mi trabajo entre los chimanes desveló que, en su caso, esa cifra puede llegar al 50 por ciento. Los japoneses adultos, que suelen beber menos agua que los estadounidenses, también obtienen en torno a la mitad de su agua a partir de los alimentos. Otros pueblos emplean diversas estrategias alimentarias para satisfacer sus necesidades de agua. Así, los dassanech, pastores del norte de Kenia, beben gran cantidad de leche (cuyo contenido en agua es del 87 por ciento) y mastican raíces cargadas de agua.

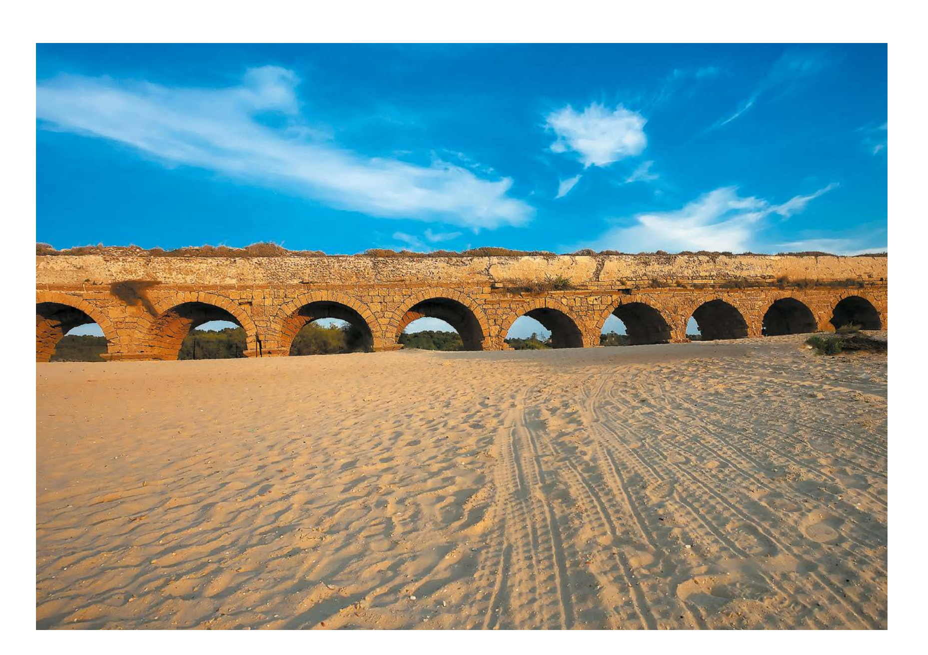
Los chimpancés, nuestros parientes vivos más cercanos, también presentan adaptaciones alimentarias y conductuales enfocadas a la obtención de agua. Por ejemplo, la recogen usando hojas a modo de esponja y lamen piedras húmedas. La primatóloga Jill Pruetz, de la Universidad Estatal de Texas, ha descubierto que en entornos muy cálidos, como las sabanas senegalesas de Fongoli, los chimpancés se refugian en cuevas frescas durante el día y salen a buscar comida por la noche, para minimizar el agotamiento por el calor y preservar el agua corporal. Con todo, los primates no humanos consumen la mayor parte del agua que necesitan en forma de frutas, hojas y otros alimentos.

Los humanos hemos evolucionado para utilizar menos agua que los chimpancés y otros simios superiores (a pesar de que sudemos más que ellos), como demuestra un reciente trabajo encabezado por Herman Pontzer, de la Universidad Duke. En cambio, dependemos más del agua que bebemos que de la contenida en los alimentos, y por eso nos cuesta más mantenernos hidratados.

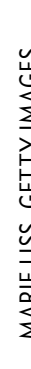
No obstante, la cantidad de agua que se considera saludable varía de un sitio a otro, e incluso de una persona a otra. En la actualidad existen dos recomendaciones distintas en cuanto a la ingesta de agua, que ya incluyen la contenida en los alimentos. La primera, de la Academia Nacional de Medicina de EE.UU., prescribe 3,7 litros de agua al día para los hombres y 2,7 litros para las mujeres, con un incremento de 300 y 700 mililitros en el caso de embarazadas y madres lactantes, respectivamente. La segunda, de la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria, aconseja 2,5 litros para los hombres y 2,0 para las mujeres, con los mismos aumentos en embarazadas y lactantes. Los hombres necesitan más agua que las mujeres porque, en promedio, tienen más volumen corporal y masa muscular.

Tales recomendaciones son puramente orientativas. Se trata de promedios poblacionales, calculados a partir de encuestas y otros estudios realizados en determinadas regiones. Pretenden cubrir la mayor parte de las necesidades de agua de una persona sana y moderadamente activa, residente en regiones templadas donde suele haber climatización. Algunas personas necesitarán más agua y otras menos, en función de factores como los hábitos, el clima, el nivel de actividad o la edad.

De hecho, la ingesta de agua varía enormemente incluso en países donde el abastecimiento, en general, está asegurado, como puede ser Estados Unidos. La mayoría de los hombres toman entre 1,2 y 6,3 litros al día, y las mujeres, entre 1,0 y 5,1 litros. A lo largo de nuestra evolución, es probable que el consumo de agua de nuestros antepasados también presentara grandes



LA ANTIGUA CIUDAD de Cesarea Marítima obtenía agua de manantiales distantes por medio de acueductos.



variaciones según el nivel de actividad, la temperatura, la exposición al viento y a la radiación solar, el tamaño del cuerpo o la disponibilidad de agua.

Pero a veces ocurre que dos personas de similar edad y condición física, y que viven en el mismo entorno, consumen cantidades de agua radicalmente distintas y están ambas sanas, al menos a corto plazo. Esas diferencias pueden tener que ver con algunas experiencias vitales tempranas. En el transcurso del desarrollo fetal, los humanos atravesamos un período sensible que influye en muchas funciones fisiológicas, entre ellas el equilibrio hídrico del organismo. Durante la gestación y la lactancia, recibimos señales sobre nuestro ambiente nutricional, las cuales podrían determinar nuestras necesidades de agua.

Los experimentos demuestran que restringir el agua a ratas y ovejas preñadas provoca cambios fundamentales en la manera en que sus crías detectan la deshidratación. En concreto, los descendientes de esas madres privadas de agua se deshidratan más (su orina y su sangre están más concentradas) antes de sentir sed y buscar agua, en comparación con las crías nacidas de madres a las que no se les ha limitado el agua. Esos resultados indican que la sensibilidad a la deshidratación se establece durante la gestación.

Por lo tanto, las señales relacionadas con la hidratación que recibimos durante el desarrollo fetal podrían determinar cuándo sentimos sed y cuánta agua beberemos en las etapas posteriores de nuestra vida. De algún modo, esas experiencias tempranas preparan a los descendientes para la cantidad de agua que encontrarán en su entorno. Si una mujer embarazada vive en una zona con poca agua y sufre deshidratación crónica, puede que sus hijos beban menos de manera sistemática, lo cual constituiría un rasgo adaptativo en aquellos lugares donde no es fácil conseguir agua. Sin embargo, aún habrá que investigar mucho para verificar esta hipótesis.

APRENDER A ENCONTRAR AGUA

Aunque nuestras experiencias vitales tempranas puedan determinar cuánta agua bebemos sin que seamos conscientes de ello, encontrar fuentes de agua potable es algo que debemos aprender de manera activa. Yo descubrí los efectos hidratantes de la papaya por accidente, pero los chimanes buscan deliberadamente alimentos ricos en agua. En un entorno donde no hay agua potable, comer agua en vez de beberla puede proteger contra los patógenos. De hecho, en mi estudio hallamos que los chimanes que consumen más agua a partir de frutas, como las papayas, y otros alimentos sufren menos diarreas.

Muchas sociedades han incorporado a sus tradiciones alimentarias bebidas fermentadas de bajo contenido alcohólico, que pueden constituir fuentes de hidratación esenciales porque la fermentación elimina las bacterias. (Las bebidas de mayor graduación, en cambio, reducen las reservas de agua del organismo al aumentar la producción de orina.) Al igual que otros pueblos amazónicos, los chimanes toman «chicha», una bebida fermentada a base de yuca o mandioca. Entre los hombres chimanes, el consumo de chicha se ha asociado a un menor riesgo de deshidratación.

Conseguir suficiente agua es uno de los retos más antiguos y acuciantes de la humanidad. Así que quizá no es extraño que cartografiemos mentalmente la ubicación de las fuentes de agua, ya sea un área de servicio en la autopista, un oasis en medio del desierto o una planta selvática. Mientras miraba a Julio cortar aquel bejuco, su hijo también lo observaba y aprendía dónde se hallaba esa vital fuente de agua. Vislumbré cómo se transmite ese conocimiento de generación en generación y, al hacerlo, entendí que sudar la gota gorda y descubrir maneras de reponer el agua perdida es una parte importante de lo que nos hace humanos. ■

PARA SABER MÁS

Water from fruit or the river? Examining hydration strategies and gastrointestinal illness among Tsimane' adults in the Bolivian Amazon. Asher Rosinger y Susan Tanner en *Public Health Nutrition*, vol. 18, págs. 1098-1108, abril de 2015.
Nocturnal behavior by a diurnal ape, the West African chimpanzee (*Pan troglodytes verus*), in a savanna environment at Fongoli, Senegal. Jill D. Pruetz en *American Journal of Physical Anthropology*, vol. 166, págs. 541-548, julio de 2018.
Dehydration and persistence hunting in *Homo erectus*. Martin Hora et al. en *Journal of Human Evolution*, vol. 138, art. 102682, enero de 2020.
Biobehavioral variation in human water needs: How adaptations, early life environments, and the life course affect body water homeostasis. Asher Y. Rosinger en *American Journal of Human Biology*, vol. 32, art. e23338, enero/febrero de 2020.
Repeated mutation of a developmental enhancer contributed to human thermoregulatory evolution. Daniel Aldea et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 118, art. e2021722118, abril de 2021.
Evolution of water conservation in humans. Herman Pontzer et al. en *Current Biology*, vol. 31, págs. 1804-1810.e5, abril de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

Incidencia de la dieta en la hominización. William R. Leonard en *IyC*, febrero de 2003.
Origen de la piel desnuda. Nina G. Jablonski en *IyC*, abril de 2010.

por Marc Boada Ferrer

Marc Boada Ferrer es divulgador científico y experto en ciencia experimental.



El giroscopio de Foucault

Un instrumento clásico para observar la rotación de la Tierra sin salir del laboratorio

Jean Bernard Léon Foucault (1819-1868) es archiconocido por haber sido el primer científico que logró demostrar la rotación de nuestro planeta sin necesidad de observar las estrellas «fijas». Para ello, se valió del celebérrimo péndulo que hoy lleva su nombre y que decora numerosos museos de ciencia en todo el mundo.

Este artefacto, de construcción sencilla pero uso delicado [*véase* «El péndulo de Foucault», por Marc Boada Ferrer; Investigación y Ciencia, diciembre de 2004], comparte dos propiedades con el giroscopio, el objetivo de este artículo. La primera se basa en la ley de inercia: el hecho de que un objeto puesto en movimiento permanecerá en ese estado a menos que sobre él actúe algún agente exterior. La segunda propiedad es tal vez menos evidente y se basa en la ley de conservación del momento angular. Para el caso que nos concierne aquí, podemos pensar en ella como en una especie de «inercia posicional», o el hecho de que un sólido mantendrá su orientación en el espacio si sobre él no actúan fuerzas externas.

*** El experimento**

Construiremos dos modelos de giroscopio: uno similar al concebido en el siglo XIX por Léon Foucault para mostrar la rotación de la Tierra, y otro más simple para usos más lúdicos.

*** Materiales**

Anillas de acero o aluminio
Volantes de inercia de latón o bronce
Bases de madera
Torno
Taladro de columna

*** Precio aproximado**

Decenas de euros (si disponemos de medios de mecanización)
Centenares de euros (si necesitamos encargar las piezas)

*** Tiempo**

Varias semanas

*** Dificultad**

Elevada. No debe acometerse si no se dispone de medios y experiencia en mecanización.



GIROSCOPIO DE TIPO FOUCAULT (*izquierda*) y giroscopio de juguete (*derecha*). Gracias al primero, en 1852 el físico francés Léon Foucault logró observar la rotación de la Tierra.

MARC BOADA FERRER

Se dice que Foucault no quedó satisfecho con el péndulo, ya que este necesitaba mucho espacio y era demasiado sensible a las perturbaciones. Quizá por ello, el genial físico parisino pergeñó otro artefacto con el que, una vez más, consiguió observar en el laboratorio el giro de nuestro planeta. Este aparato se conoce como giroscopio o giróscopo, término que fue acuñado por el propio Foucault a partir de las voces de origen griego *gyros* («giro») y *skopein* («observar»). (Si bien cabe aclarar que, en realidad, nuestro protagonista no inventó el giroscopio, pues décadas antes de sus experimentos ya existían dispositivos similares diseñados para recrear en el laboratorio los movimientos de la Tierra alrededor del Sol.)

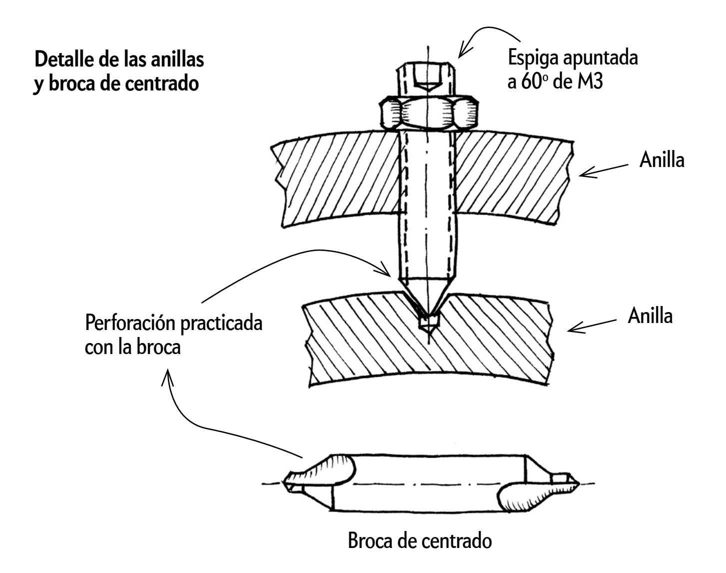
El giroscopio de Foucault consiste en un volante de inercia montado sobre un interesante mecanismo: la junta o articulación cardán (*véase la fotografía*). Esta consiste en un arreglo de tres anillos concéntricos en el que cada uno se acopla al siguiente mediante dos pequeños ejes, y donde el anillo exterior se halla sólidamente fijado a una base. Semejante disposición permite que un objeto situado en el centro (en nuestro caso, el volante de inercia) pueda adoptar todas las orientaciones posibles en el espacio. Por tanto, cuando el volante gire a gran velocidad, permanecerá mecánicamente desconectado del soporte y, por ende, de cualquier otro marco de referencia. Es precisamente este principio el que nos permitirá demostrar la rotación de la Tierra.

Aunque el giroscopio nació como un instrumento científico, más tarde sería simplificado y reconvertido en un clásico de los juguetes científicos imprescindible en cualquier gabinete de física experimental. En lo que sigue describiremos estas dos versiones del instrumento y algunos de los fenómenos que nos permiten estudiar.

Articulación de cardán

Pasemos, pues, a la parte técnica. Lo primero que debemos advertir es que la fabricación de un giroscopio es delicada, ya que exige una mecánica de gran precisión. Se trata, por tanto, de un excelente ejercicio de entrenamiento por el que todo experimentador debería pasar si desea adquirir la habilidad necesaria para fabricar aparatos mecánicos de gran precisión. Y aunque aquí no nos plantearemos acercarnos a la extraordinaria calidad técnica del instrumento original de Foucault, sí intentaremos construir un artefacto que muestre sus propiedades principales.

MARC BOADA FERRER



Observemos de nuevo la fotografía que encabeza este artículo. En primer lugar, tenemos una base de madera que esconde un hueco interior donde se aloja una espesa placa de latón, la cual aporta solidez y estabilidad. En nuestro caso, el peso del conjunto asciende a 2,5 kilos, aunque puede sin duda ser superior.

Fijada sobre la base encontramos una columna (quizá demasiado alta y delgada, ya que amplifica las ligeras vibraciones del mecanismo). Al capitel de la columna se fijan las tres anillas de la suspensión cardán, las cuales pueden ser de acero, latón o aluminio. En este prototipo tienen una sección de 5×5 milímetros (tal vez algo delgadas, ya que en ocasiones tienen también tendencia a vibrar). Es posible que lo mejor sea encargarlas a una empresa especializada en corte con láser, plasma o agua a presión.

Una vez dispongamos de las anillas, y con el máximo cuidado posible, comenzaremos la mecanización de la anilla exterior. Marcaremos uno de sus diámetros, donde mecanizaremos dos taladros roscados que serán asiento de sendas espigas Allen de tres milímetros y con el extremo aguzado; es decir, de rosca métrica M3. Continuaremos con las dos anillas interiores en las que, además de hacer los mismos taladros roscados, marcaremos otro diámetro, perfectamente perpendicular al primero, y donde con gran cautela perforaremos unos taladros ciegos.

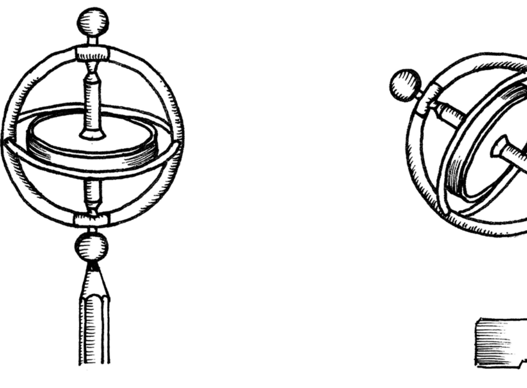
Observemos con detalle el dibujo superior y reflexionemos sobre el porqué de esta solución. Buscamos un sistema mecánico lo más simple posible y que tenga, a la vez, un rozamiento mínimo y un ajuste sin juegos. Por supuesto, podríamos utilizar microrrodamientos de bolas en estos puntos de rotación, pero eso requiere un taller mecánico equipado con torno, fresadora, plato divisor y taladro de columna. Y no solo eso, sino que deberemos disponer de unas habilidades mecánicas casi excepcionales. Así las cosas, habremos de conformarnos con fabricar un dispositivo de rotación mucho más simple.

En este caso, la única alternativa es el acoplamiento cónico. Para mecanizar la parte «en negativo» del acoplamiento, que es precisamente el taladro ciego, deberemos utilizar una broca especial, llamada «de centrado». La forma de sus puntas (ambos extremos están afilados), que también reproducimos en el dibujo, da lugar a un extremo cilíndrico cortante, (como una broca diminuta) asentado sobre un cono afilado, de forma similar a la de un avellanador pero con un ángulo de 60 grados. La robustez de esta broca y su afilado especial garantizan que el taladro así obtenido estará en su sitio y gozará de una buena geometría interior.

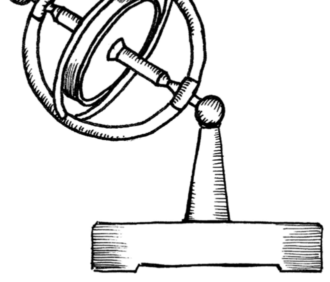
Mecanizados los anillos, procederemos a aguzar las puntas de las espigas Allen M3. Las colocaremos en el torno y rebajaremos sus puntas hasta obtener unos conos de exactamente 60 grados, los cuales puliremos hasta que las puntas queden perfectamente abrillantadas y libres de rayas o defectos. Si no disponemos de un pequeño torno, una alternativa es montar la espiga en el portabrocas de un taladro y, con este en marcha, aplicar el extremo libre de la espiga, en ángulo, sobre papeles abrasivos de grano progresivamente más fino. Un soporte de madera en ángulo nos ayudará a mantener fijo el taladro.

La fase final de abrillantado puede conseguirse con pastas abrasivas de carrocería, pulimento de uso doméstico para latón

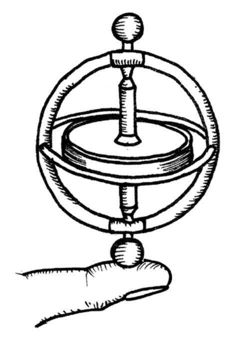
Experimentos sencillos con el giroscopio de juguete



Sobre la punta de un lápiz

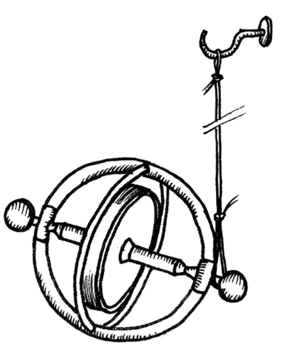


Sobre una columna

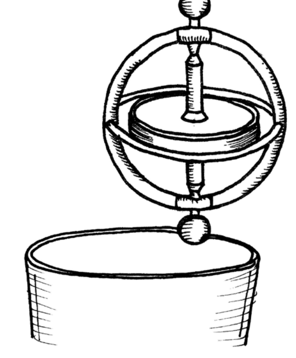


Sobre un dedo

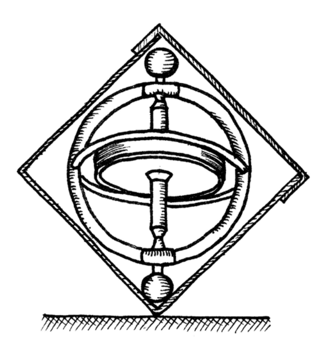
Sobre un hilo tenso



Colgado de un hilo



Sobre el canto de un vaso



En una caja apoyada en un vértice

MARC BOADA FERRER

y aleaciones similares, o pasta diamantada de uso general, más barata de lo que parece y muy eficaz. Para pulir el interior de los taladros ciegos colocaremos un mondadientes en el portabrocas del taladro, lo impregnaremos con pasta de pulir y lo introduciremos ejerciendo una cierta presión. Con una lupa cuentahílos verificaremos que el acabado es el correcto, liso y brillante.

Volante de inercia

Pasemos ahora al diseño y la construcción del volante de inercia. Si hasta aquí hemos sido meticulosos, ahora habremos de subir un peldaño más hacia el objetivo, casi utópico, de obtener un volante de inercia perfecto. Para lograrlo, deberemos tornear un disco con su eje, partiendo de algún metal o aleación de alta densidad. Las posibilidades son varias. Lo primero que nos viene a la cabeza es el plomo, pero su extrema ductilidad y falta de dureza desaconsejan su uso. Una segunda opción es el hierro, si bien este no será lo bastante denso. Algunos metales que serían óptimos, como el wolframio, escapan a nuestras posibilidades técnicas y económicas. Por tanto, una opción tradicional es el bronce o el latón: aleaciones duras y fáciles de mecanizar, pero lo suficientemente densas como para que el volante adquiera una inercia considerable.

El diseño específico del volante dependerá de nuestra destreza técnica y de nuestras posibilidades de mecanización. Sin duda, un disco cilíndrico funciona bien, es fácil de obtener y resulta muy adecuado para giroscopios pequeños, como el instrumento de juguete que aparece también en la fotografía. Sin embargo, con la ayuda de un buen tornero o de un torno de control numérico, podremos mecanizar un volante delgado en su parte central y con una masa perimetral: una llanta con forma de toro que aumentará aún más la inercia para un peso dado. No obstante, esto condicionará el sistema que habremos de emplear para accionar el giroscopio. Expliquémonos.

Imaginemos que ya hemos construido nuestro aparato. Habrá llegado el momento de activarlo, para lo cual dispondremos de dos estrategias. La primera pasa por la técnica clásica de enrollar en su eje un hilo resistente y tirar con fuerza de él; una práctica óptima para el giroscopio de juguete. La segunda consiste en activarlo con la ayuda de un motor eléctrico dotado, en su eje, de un cilindro de goma. Antes de explicar por qué, centrémonos en la primera opción.

Observemos con detenimiento la fotografía. Apreciaremos que en el eje del volante hemos practicado unos pequeños taladros. En uno de ellos introduciremos un extremo del hilo, luego lo enrollaremos ordenadamente y, por último, tiraremos de él. Al hacerlo experimentaremos una notable oposición, ya que el volante se resiste a acelerarse. Dicha resistencia aumenta con la masa y, una vez superado determinado peso, el tirón no conseguirá acelerarlo lo suficiente. Al hacer pruebas podremos ver que, con un buen tirón, un

volante como el del giroscopio de juguete (de 60 milímetros de diámetro y 9 o 10 de espesor, y con una masa de entre 200 y 250 gramos) adquiere una velocidad superior a las 5000 revoluciones por minuto, lo que proporciona una inercia suficiente para poder experimentar durante varios minutos.

En cambio, para nuestro giroscopio de tipo Foucault necesitaremos una inercia aún mayor. Por eso decíamos antes que, a fin de incrementarla, podíamos dar al volante en su parte externa la forma de un toro. Pero este procedimiento tiene un límite: solo a título orientativo, diremos que un volante toroidal de 70 milímetros de diámetro exterior con un toro de 12 milímetros funciona muy bien, y que el representado en la fotografía (80 milímetros de diámetro con un toro de 17 y una masa total de casi 500 gramos) ya necesita un gran impulso para ser acelerado. Además, sufre vibraciones intolerables al más mínimo desequilibrio; es casi un límite técnico. En cualquier caso, y con una masa tan elevada, acelerarlo con un cordel resulta imposible. Para ello habremos de recurrir a un taladro eléctrico al que, en el portabrocas, acoplaremos un pequeño cilindro de goma con el que presionaremos el volante de inercia.

Para que el volante gire con el mínimo rozamiento, optaremos por la misma solución que hemos elegido para las anillas. En los extremos del eje perforaremos los mismos agujeros ciegos, esta vez en el torno, y con dos espigas apuntadas de M3 aseguraremos la posición. Con todo ello a punto, pasaremos al montaje y al ajuste del instrumento.

Unir las piezas

La fotografía y los dibujos dejan ya bastante claro cómo montar el conjunto. Lo que no resulta tan evidente es que, al hacerlo, deberemos equilibrar todos los componentes. Para ello montaremos la anilla exterior, fija en la columna de soporte, y luego en su interior la primera anilla móvil. Procederemos a roscar las espigas aguzadas hasta que gire suavemente y sin huelgos. Por supuesto, lubricaremos los puntos de contacto y, una vez esté todo ajustado, bloquearemos la posición de las espigas con unas tuercas de M3.

El siguiente paso consistirá en comprobar que queda totalmente equilibrada; es decir, que puede mantenerse en equilibrio en cualquier posición. Si esto no ocurre, colocaremos pequeños pesos o practicaremos algunos taladros que reduzcan la masa en los lugares adecuados. Conseguido esto, fijaremos esta primera anilla móvil a la exterior (estática) con algo provisional, de forma que quede inmóvil, y montaremos la segunda anilla repitiendo el proceso anterior.

Por último, habrá llegado el momento de montar el volante en el interior de la anilla de menor tamaño y proceder a su ajuste y equilibrado por el mismo método. Pero que el conjunto se encuentre equilibrado cuando el aparato se encuentra en reposo no significa nada. Por ello, tendremos que acelerar el volante, ya sea arrollando el hilo o mediante el motor y, una vez esté girando a gran velocidad, comprobar si conserva su orientación. ¿Presenta tendencia a inclinarse? ¿Precesiona? ¿Sufre vibraciones perceptibles? Si la respuesta es afirmativa, habremos de revisar el mecanismo equilibrando y desplazando el volante fracciones de milímetro hasta que su centro de inercia en movimiento coincida con el punto de cruce de los ejes de la suspensión cardán. Será entonces cuando, en apariencia, el giroscopio quedará totalmente inmóvil, con el volante girando célere.

La magia del giroscopio

Tomemos el artefacto en las manos y giremos sobre nosotros mismos. Para nuestra sorpresa, veremos que permanecerá siempre con la misma orientación en el espacio. Dejémoslo ahora sobre la mesa, también a máxima velocidad, y toquemos o ejerzamos una ligera presión sobre una de las anillas. Curiosamente, el giróscopo se reorientará y cambiará su ángulo: un comportamiento nada intuitivo y que el lector interesado encontrará explicado en numerosos manuales de física.

Si estas pruebas iniciales dan buen resultado, podremos por fin proceder a observar la rotación de la Tierra. Para ello, colocaremos el giroscopio sobre una mesa robusta, estable y horizontal. Después aceleraremos el volante tanto como podamos, a fin de alargar todo lo posible el tiempo de observación. Previamente, en la anilla exterior móvil habremos fijado un pequeño espejo de plástico, el cual puede también observarse en la fotografía. Montemos un puntero láser sobre un soporte estable y apuntemos al espejo [*para más detalles sobre esta técnica, véase* «El magnetómetro de Gauss, versión 2.0», por Marc Boada Ferrer; Investigación y Ciencia, septiembre de 2016].

Ahora proyectemos el haz reflejado sobre un papel a varios metros de distancia. Observaremos cómo, poco a poco, el fino rayo se desplaza. En un experimento típico, el volante girará lo suficientemente rápido como para concedernos unos cinco o seis minutos de experimentación. La Tierra rota a una velocidad de $360/(24 \times 60) = 0{,}25$ grados por minuto, por lo que en esos cinco minutos habrá girado algo más de un grado. Esto puede parecernos poco, pero se trata de un ángulo perfectamente perceptible: si la distancia de proyección es de unos dos o tres metros, el desplazamiento del láser sobre la pantalla será de varios centímetros.

El experimento que acabamos de describir, la observación de la rotación de la Tierra, es sin duda uno de los más emocionantes y satisfactorios. Sin embargo, es también posible llevar a cabo actividades más lúdicas. Fijémonos en el giroscopio de juguete mostrado en la fotografía. Este es mucho más sencillo: tan solo consta de una anilla con dos espigas, a la que se une otra anilla fija que protege el volante de posibles contactos. Los ajustes son en este caso mucho más sencillos, ya que solo habremos de preocuparnos del giro del volante, pero podremos observar espectaculares fenómenos que captarán la atención de cualquier espectador.

Para ello solo tendremos que dotar al giroscopio de dos esferillas terminales en los tornillos que hacen de eje. En una de ellas marcaremos al torno una pequeña concavidad, con lo que el aparato podrá girar sobre la punta de un lápiz, sobre una columna con un pequeño alojamiento cóncavo o sobre nuestro propio dedo (*véanse los dibujos*). En la otra esfera practicaremos un corte en V, de forma que podrá situarse sobre un hilo tenso o el canto de un vaso, amén de ser colgado de un hilo vertical. Por último, si encajamos perfectamente nuestro giroscopio en el interior de una caja de cartón, la cerramos y la colocamos sobre uno de sus vértices, observaremos cómo el conjunto consigue mantenerse en esa improbable posición. Esta galería de efectos es más que demostrativa; tanto que, sin duda, nos llevará a concluir que todo nuestro esfuerzo habrá valido la pena. IyC

EN NUESTRO ARCHIVO

Léon Foucault. William Tobin en *IyC*, septiembre de 1998.
El péndulo de Foucault. Marc Boada Ferrer en *IyC*, diciembre de 2004.

por Bartolo Luque

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.



Caligramas matemáticos

Combinaciones ingeniosas de literatura, diseño gráfico y matemáticas

Los caligramas son poemas en los que el discurso literario se mezcla con el visual a partir de un juego entre la disposición geométrica de las letras y su tipografía. El poeta vanguardista Guillaume Apollinaire (1880-1918) llamó inicialmente a sus primeras síntesis entre palabra e imagen *idéogrammes lyriques*, o «ideogramas líricos». El término *caligrama* procede del título de su obra *Calligrammes: Poèmes de la paix et de la guerre 1913-1916*, publicado en 1918.

Debido a lo anterior, mucha gente piensa que los caligramas son otra creación de las vanguardias poéticas de principios del siglo xx. Sin embargo, estos encuentros entre lenguajes artísticos distintos son en realidad anteriores. Un ejemplo notable lo hallamos en el poema *El cuento del ratón* (*The mouse's tale*) que Lewis Carroll incluyó en el tercer capítulo de *Alicia en el País de las Maravillas* (*véase la figura 2*). En traducción al español de Luis Maristany, este caligrama reza:

Furia interpeló a un ratón
que sorprendió en un rincón.
«Convocaré un tribunal
que no cueste ni un real.
¡Ea, vamos! No hay excusa,
que aquí soy yo quien acusa,
que en verdad esta mañana
de esto solo tengo gana.»
Le dijo el ratón al perro:
«Estimado señor, pero
"Si no hay ni juez ni jurado,
tal juicio está descartado."»
«Seré el jurado y el juez
—dijo el taimado— a la vez.
Y la condena en total
será pena capital.»

Carroll era matemático, y este caligrama aparece en una obra donde se mezclan literatura, lógica y matemática recreativa. Pero, por sí mismo, no merece el apelativo de caligrama matemático. ¿Qué podemos considerar uno? El poema del artista matemático noruego Mike Naylor titulado *Decision tree* («árbol de decisiones») constituye un buen ejemplo. En él, Naylor construye sucesivos dilemas morales soportados por la estructura, tan cara en ciencias de la computación, de un árbol binario (*véase la figura 3*). Aquí, junto al poema original hemos incluido una traducción oficiosa al español carente de rima.

Tal y como nos ha explicado su autor: «El poema comienza con la pregunta del tronco, la cual remite a algo que sabemos que probablemente no deberíamos hacer. El siguiente nivel relata la decisión en sí; el tercero indica la reacción a nuestra decisión, y el cuarto muestra cómo afectará todo ello a nuestro futuro. El movimiento hacia la izquierda representa las decisiones "buenas" o "morales", mientras que el que se dirige hacia la derecha contiene las motivaciones más "cuestionables". La mayoría de los poemas que surgen al recorrer el árbol son algo sombríos o deprimentes. De todos los poemas posibles, solo hay dos en los que se tiene la sensa-

1. CALIGRAMA concebido por Punya Mishra, pedagogo de la Universidad Estatal de Arizona. ¿Cuál es la palabra que se repite en esta espiral infinita?

CORTESÍA DE PUNYA MISHRA

ción de que el narrador está seguro de sí mismo: uno es el del extremo izquierdo, donde el narrador sigue un estricto código moral; el otro es el poema opuesto, en el extremo derecho. Los poemas que vagan de manera incierta y cambian de dirección a mitad de camino conducen a resultados que no son perfectos. Aunque esta obra no contenga ningún punto fuerte sobre la moralidad, sí que tiene algo que decir sobre la coherencia. En la vida, como en las matemáticas, somos libres de crear nuestras propias reglas. Pero, si queremos estar satisfechos en la vida, o crear matemáticas con sentido, habremos de atenernos a esas reglas y seguirlas de manera consecuente».

Déjenme que les presente otro ejemplo de caligrama matemático, esta vez de la mano del escritor de microrrelatos colombiano Rafael García Z. Quizás el relato hiperbreve más conocido sea *El dinosaurio*, de Augusto Monterroso. Consiste simplemente en: «Cuando despertó, el dinosaurio todavía estaba allí». Más tarde, el escritor José María Merino, con guasa de carnaval gaditano, homenajeó a Monterroso junto al protagonista de *La metamorfosis* de Kafka en su microrrelato titulado *Cien*: «Al despertar, Augusto Monterroso se había convertido en un dinosaurio. "Te noto mala cara", le dijo Gregorio Samsa, que también estaba en la cocina».

García Z. nos hace un guiño parecido con un microrrelato y un caligrama matemático. El microrrelato se titula *Una mente brillante*: «Cuando el profesor Josef H. Müller, una de las mentes más brillantes del siglo XXII, decidió vender su alma al diablo a cambio de la inmortalidad, no lo hizo solamente impulsado por el deseo de perpetuar su desmedido ego, sino también, aunque resulte difícil de creer, por un afán desinteresado y genuino de poner todos sus conocimientos al servicio del género humano. Muchos, y en muy variados campos, fueron los aportes del profesor Müller a la ciencia durante los siglos XXII, XXIII y XXIV; sin embargo, muy a su pesar, ninguno de ellos le generó tanta fama y notoriedad como los tratamientos de belleza —nunca por él revelados— que utilizaba para el cuidado de su piel, siempre suave y tersa a pesar del paso de los años».

36 ALICE'S ADVENTURES IN WONDERLAND

wonder at the Mouse's tail; 'but why do you call it sad?' And she kept on puzzling about it while the Mouse was speaking, so that her idea of the tale was something like this –

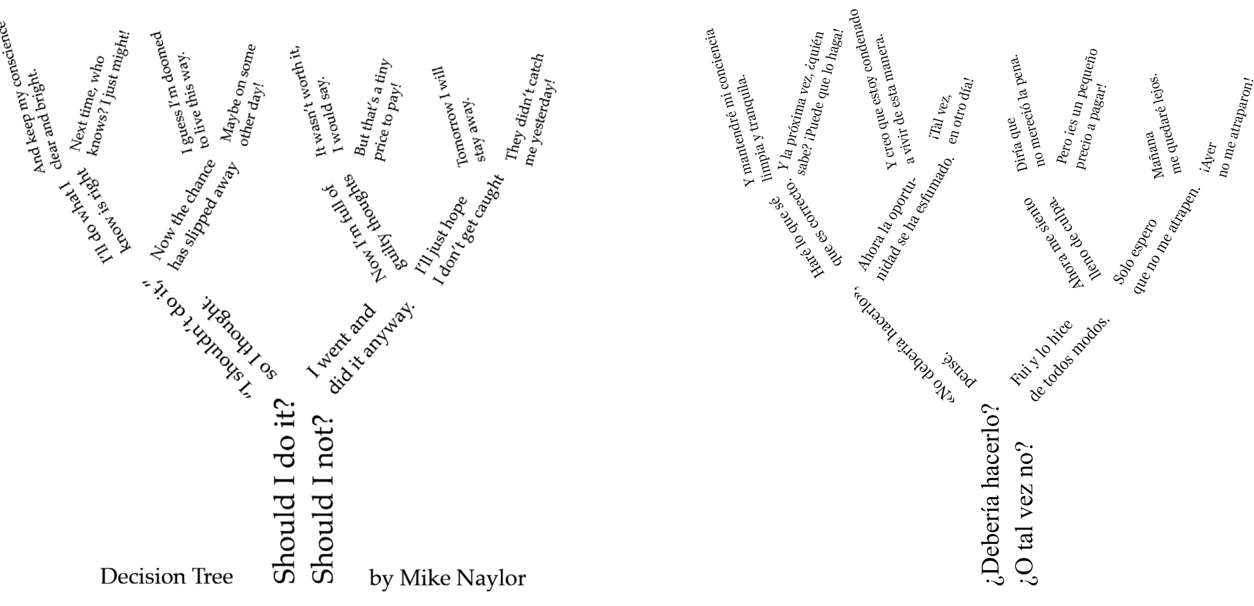
'Fury said to a mouse that he met in the house, "Let us both go to to law: *I* will prosecute *you*. Come, I'll take no denial: we must have a trial: for really this morning I've nothing to do." Said the mouse to the cur, "Such a trial, dear sir, with no jury or judge, would be wasting our breath." "I'll be judge, I'll be jury," said cunning old Fury: "I'll try the whole cause, and condemn you to death." '

2. POEMA de Lewis Carroll *El cuento del ratón* (*The mouse's tale*), incluido en la edición de 1865 de *Alicia en el País de las Maravillas*.

El caligrama matemático al que nos referíamos, que García Z. titula *La demostración* (*véase la figura 4*), está inspirado en una definición del propio Josef H. Müller: «Un microrrelato es un círculo perfecto con un diámetro de unas cuantas palabras». Lo que hace extraordinario este caligrama matemático es que su microrrelato unidimensional («La demostración literaria de la redondez del círculo no es tan compleja como podría pensarse. Basta con eliminar el punto final y comenzar el texto así:»), al cerrarse formando un círculo, hereda la inexistencia de principio y fin de la circunferencia, lo que acaba convirtiendo el microrrelato en la obra más extensa (numerable) de todos los tiempos.

Ambigramas

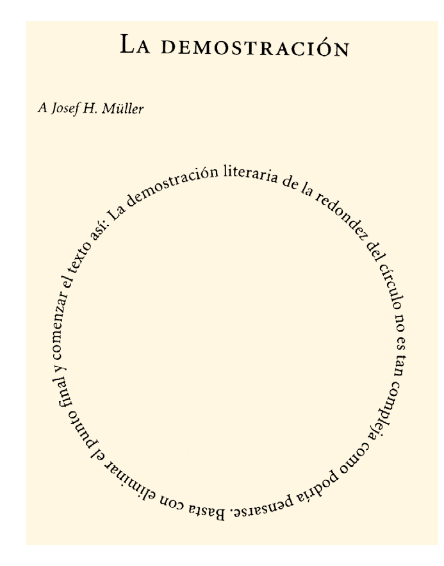
El pedagogo Punya Mishra, de la Universidad Estatal de Arizona, es un reconocido diseñador de ambigramas, o palabras que pueden leerse en sentidos opuestos. Dos magníficos ejemplos son sus obras *Truth & beauty*, o «verdad y belleza», donde *verdad* se convierte en *belleza* y viceversa si giramos el diseño 180 grados (*véase la figura 5*), o el ambigrama simétrico de la palabra s*ymmetry*, «simetría» (*véase la figura 6*). Los dos pueden con-



3. POEMA *Decision tree* («árbol de decisiones»), del matemático y artista noruego Mike Naylor.

siderarse caligramas matemáticos, pues ambos juegan con la grafía para ilustrar la simetría y tratan conceptos de interés matemático.

El caligrama de Mishra que abre esta columna (*véase la figura 1*) juega con la idea de infinito, pero aprovechado la trayectoria atractiva de una espiral cuadrada. En principio, la idea no es muy diferente de la que ilustran los poemas espirales de las inscripciones tartesias, pero resulta muy especial por su toque ambigramático: ¿nos encontramos frente a la repetición infinita de la palabra *finite* («finito») o *infinite* («infinito»)?



4. MICRORRELATO circular *La demostración*, del escritor Rafael García Z.



5. AMBIGRAMA *Truth & beauty*(*«verdad y belleza»*), de Punya Mishra. El mismo texto puede leerse al girar la página 180 grados.



6. AMBIGRAMA *Symmetry* («simetría»), de Punya Mishra.

Mi caligrama favorito de todos los que aparecen en el trabajo «Of art & math: Introducing symmetry», escrito por Mishra junto con el matemático Gaurav Bhatnagar, es uno donde la función exponencial se convierte en el logaritmo al reflejarse con respecto a la diagonal $y = x$ (*véase la figura 7*). Se trata de una ilustración magistral de la relación entre las gráficas de una función y su inversa.

Esto no es una pipa

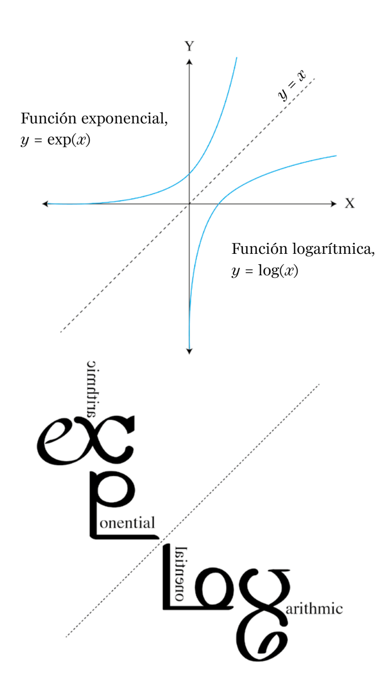
Aunque con nombres distintos, los caligramas son realmente tan antiguos como la propia escritura. La caligrafía china es un antecedente obvio. En Occidente, durante la Edad Media, se les conocía con nombres como *carmina figurata*, o «poemas figurados», y podemos rastrearlos hasta poetas griegos del período helenístico como Simias de Rodas y Teócrito. En algunas ofrendas religiosas de la época se inscribía el nombre del donante y se añadían unos versos con una grafía que se adaptaba a la forma del objeto ofrendado.

La idea de escribir este mes sobre caligramas matemáticos me vino a la cabeza al contemplar la portada y la contraportada de la obra *Mentes maravillosas: Los matemáticos que cambiaron el mundo*, de Ian Stewart (Crítica, 2018), donde aparecen las caras de una docena de matemáticos famosos. Sus rostros están dibujados a partir de las grafías de los números del 0 al 9 y algunos paréntesis y, sin embargo, resultan perfectamente reconocibles.

El filósofo e historiador francés Michel Foucault opinaba que los caligramas «acercan lo máximo posible el texto y la imagen» al desdibujar dualidades como «mostrar y nombrar; figurar y hablar; reproducir y articular; intimar y significar; mirar y leer». Para Foucault, el famoso cuadro de René Magritte *La traición de las imágenes*, una pintura paradójica donde aparece una pipa bajo la cual se lee «esto no es una pipa», puede considerarse un caligrama que hace chocar palabra e imagen en una contradicción. ¿Podríamos calificar entonces el cuadro de Magritte como un caligrama matemático?

Y para acabar, ¿qué me dicen de la siguiente conversación, a gritos en la distancia, protagonizada por Leonardo de Pisa y un listillo que se aprovecha de su trastorno obsesivo compulsivo?

—¡Fibonacci!
—¿Qué?
—¿Qué?
—¿Qué de qué?



7. CALIGRAMA de Mishra sobre las funciones exponencial y logarítmica. El diseño ilustra las propiedades simétricas de una función y su inversa.

—¿Qué de qué de qué?
—¿Qué de qué de qué de qué de qué?
—Ja, ja, ja...
—Muy gracioso, sí...

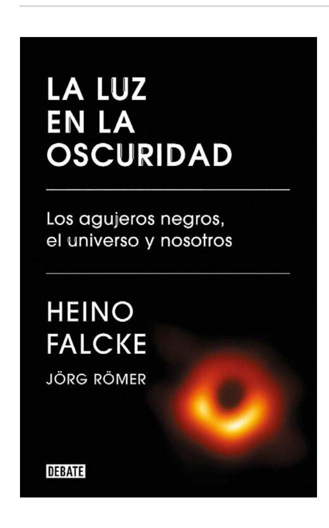
En una lectura típica no nos paramos a contar el número de palabras de las frases, ya que no suele tener importancia alguna. Pero, en este caso, el número de *qués* forman una sucesión de Fibonacci: 0, 1, 1, 2, 3, 5... Según Foucault, aquí estaríamos deshaciendo la dualidad leer-contar. ¿Se trata, por tanto, de un caligrama matemático? IyC

PARA SABER MÁS

El mago natural y otros abracadabras. Rafael García Z. Editorial Ficticia, 2007.
Alicia en el País de las Maravillas/A través del espejo. Lewis Carroll. Libros del Zorro Rojo, 2016.
punyamishra.com. Página web de Punya Mishra.
mike-naylor.com. Página web de Mike Naylor.

EN NUESTRO ARCHIVO

El retrato de Luca Pacioli. Bartolo Luque en *IyC*, diciembre de 2014.
***Symmetry*, un film palíndromo.** Bartolo Luque en *IyC*, enero de 2016.
La poesía visual matemática de Cristóbal Vila. Bartolo Luque en *IyC*, enero de 2020.



LA LUZ EN LA OSCURIDAD
LOS AGUJEROS NEGROS, EL UNIVERSO Y NOSOTROS

Heino Falcke y Jörg Römer
Debate, 2021
336 págs.

Crónica de una foto imposible

Un relato en primera persona del esfuerzo colectivo que supuso retratar el entorno inmediato de un agujero negro

Hay un género de divulgación científica que comparte con los grandes reportajes periodísticos o con las crónicas viajeras de exploración y descubrimiento un narrador que cuenta en primera persona una aventura apasionante. Los grandes planes y sus dificultades, la incertidumbre al adentrarse en territorio desconocido, los errores, los aciertos y, finalmente, la suerte que decide en el último momento el éxito o el fracaso de la empresa se pintan ante nuestros ojos casi antes de que la historia haya concluido. Quizá aún no esté claro cuál es el poso que va a quedar cuando el viento de la historia amaine, pero la oportunidad que nos ofrece el cronista de atisbar el desarrollo de la historia desde dentro otorga al relato un valor intemporal.

La luz en la oscuridad pertenece a ese género de crónicas en las que lo más importante es la aventura científica de la que el protagonista nos deja tomar parte a través de sus ojos y de su pluma. Cierto es que cualquiera que no viva en un monasterio de una montaña lejana conoce el final feliz de esta singular hazaña: la obtención de la primera «foto» de un agujero negro. Pero la aventura es lo que ocurre en el camino que nos lleva hasta allí, y conocer el final no resta un ápice de interés al relato de la singladura narrado por el capitán de la nave, el astrofísico Heino Falcke, director científico del Telescopio del Horizonte de Sucesos (EHT), con la colaboración del periodista Jörg Römer, editor de la sección de ciencia del semanario alemán Der Spiegel.

El proyecto EHT, en el que han colaborado un gran número de científicos y observatorios de varios países, España incluida, surgió con el objetivo de «fotografiar un agujero negro» tan cerca de su horizonte de sucesos como fuera posible. El objetivo era que los fenómenos que deben de caracterizarlo de acuerdo con las predicciones de la relatividad general pudieran ponerse de manifiesto. Un proyecto que se concibe como el sueño del niño curioso que Falcke nos cuenta que fue, y que inicialmente parece, además, un sueño irrealizable, tanto por las dificultades técnicas como por las conceptuales. ¿Cómo fotografiar algo que, por definición, no emite ninguna luz? ¿Qué se espera ver en realidad? ¿Cómo se ha de interpretar la imagen obtenida? [*Véase* «La prueba del agujero negro», por Dimitrios Psaltis y Sheperd S. Doeleman; Investigación y Ciencia, noviembre de 2015.]

El libro hace un largo recorrido por la historia de la astronomía y la astrofísica para presentar a todos los actores del drama que posteriormente se nos va a contar: planetas, estrellas, galaxias, púlsares, cuásares... y, por supuesto, agujeros negros. Esta historia corre paralela a la de las herramientas que nos han permitido «ver» y medir cada vez más allá, y a la de los científicos que la han protagonizado, a los cuales se incorpora el propio Falcke, cuya trayectoria vital, espiritual y científica forma parte integral del libro.

Este recorrido histórico desemboca en la concepción del proyecto EHT, su preparación, organización y —muy importante— financiación, y alcanza el clímax durante las noches en que los observatorios participantes se coordinaron para formar, de manera efectiva, un único radiotelescopio enfocado en el agujero negro supermasivo que se esconde en el corazón de la galaxia M87 y que se manifiesta a través de la emisión de un chorro gigante de partículas ultrarrelativistas. De la mano del autor, conocemos el ambiente en el que trabajan los astrofísicos durante las observaciones (la tensión, el sueño y la incertidumbre, pero también la tremenda ilusión) y el anticlímax de los meses de espera hasta que los datos brutos obtenidos son validados, filtrados y combinados para proporcionar la famosa imagen final.

Una de las cosas más destacables de *La luz en la oscuridad* es el esfuerzo que se ha hecho por describir la ciencia como una empresa colectiva, poniendo en valor las contribuciones de los muchos técnicos, estudiantes y científicos que han contribuido al proyecto EHT en particular y al progreso de la física y la astrofísica en general. El libro incluye, por ejemplo, la lista de todos los miembros del EHT. Hay también un intento de vindicación de algunas figuras que han quedado injustamente en segundo plano, como Georges Lemaître, cuyas contribuciones a la física y a la cosmología modernas (el concepto de gran explosión, la ley de Hubble-Lemaître, la interpretación de la «singularidad de Schwarzschild» del agujero negro) han quedado a la sombra de otros investigadores, como Edwin Hubble [*véase* «El universo de Georges Lemaître», por Dominique Lambert; Investigación y Ciencia, abril de 2002].

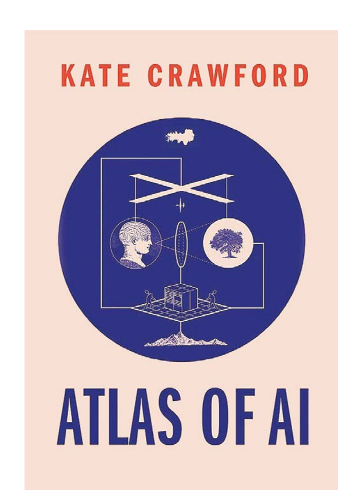
Sin embargo, ese esfuerzo se ve un tanto oscurecido por el afán por subrayar las contribuciones alemanas a la física y la astrofísica a lo largo de la historia. No cabe duda de que a un español, que no puede hacer nada parecido sin hacer el ridículo, esto no puede dejar de producirle una gran envidia, tanta como la que produce la generosísima dotación económica del premio Spinoza que permitió a Falcke iniciar este proyecto. Pero no es esto lo que motiva la crítica. El orgullo nacional acaba traicionando al autor cuando califica de forma general los logros de Kepler como «más esenciales» que los de Galileo, algo que no puede mantener seriamente quien conozca el papel fundamental que desempeñan en la física moderna los principios de relatividad y de equivalencia, a los que Galileo contribuyó de manera muy destacada. Tampoco se puede reprimir una sonrisa al leer que el artículo de Johannes Droste (discípulo de Lorentz y descubridor independiente de la solución que describe el agujero negro más sencillo y de las leyes del movimiento de la materia en torno a él) fue ignorado porque lo escribió en neerlandés en una época en que escribir en alemán era aún importante (en realidad, el artículo se publicó en inglés). Las razones por las que ciertas contribuciones cientí-

ficas fundamentales, como las de Droste y Lemaître, pasan inadvertidas son uno de esos temas que la sociología de la ciencia quizá debería esclarecer. Y ya que estamos con el orgullo nacional y las contribuciones ignoradas, es una pena que el libro atribuya incorrectamente la creación del calendario gregoriano a los astrónomos vaticanos en vez de a los salmantinos.

Es también muy interesante la reflexión sobre la ciencia, la fe, el ser humano y los límites de todos ellos con que finaliza el libro. Falcke nos habla de su fe en Dios y de cómo, para él, forma parte junto con la ciencia de su búsqueda de la verdad y del sentido del universo. No es un punto de vista muy extendido hoy en día. Entre los científicos suele predominar el agnosticismo o un maniqueísmo en el que la ciencia está de un lado y cualquier otro tipo de creencia no sustentada en el método científico en el otro. La visión de Falcke es integradora y conciliadora, lejos de dogmatismos de uno u otro signo, algo de agradecer en este mundo tan polarizado.

El libro brilla en las descripciones de los experimentos (los detalles, la increíble precisión de las medidas) y de los fenómenos astrofísicos (su objetivo principal), pero deja bastante que desear cuando se explican fenómenos y teorías físicas fundamentales. No es tanto que las simplificaciones dejen insatisfechos a los especialistas, ya que el libro está dirigido a un público muy amplio. Se trata más bien de las imprecisiones y de la perpetuación de ciertos errores en la descripción de los agujeros negros y de los fenómenos que tienen lugar en su entorno o en su interior, que a veces están muy extendidas incluso entre los científicos. Por ello, puede que este libro no sea el mejor lugar para profundizar sobre estos aspectos de los agujeros negros, sobre la relatividad general o sobre la física de partículas, aunque probablemente no era ese el objetivo primordial del libro. Tampoco lo era el de crear una obra de un alto nivel literario, algo que ciertamente no es. En cambio, si el objetivo era escribir una crónica urgente desde el frente donde se libra la lucha del ser humano por entender el universo y entenderse a sí mismo, ese fin se ha conseguido por completo.

—Tomás Ortín Miguel
Instituto de Física Teórica
Universidad Autónoma de Madrid/CSIC



ATLAS OF AI
POWER, POLITICS, AND THE PLANETARY COSTS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE
Kate Crawford
Yale University Press, 2021
336 págs.

Desnudar la inteligencia artificial mientras la vestimos

La necesidad del enfoque ético y social de las tecnologías emergentes

Cuanto tenía seis años, mi madre me compró un atlas. Aprendí entonces el tópico, ahora manido, de que los mapas no son el territorio. Marcaba en él recorridos y viajes que solo sucedían en mi imaginación. Descubrí luego que la cartografía pretende representar una realidad inabarcable; la distorsiona y la simplifica utilizando algunas licencias imprescindibles para, por ejemplo, plasmar en un plano bidimensional los detalles de un planeta tridimensional. Algo imposible.

Kate Crawford arranca de manera similar su imposible atlas de la inteligencia artificial. Con la curiosidad de una niña plantea preguntas sencillas, aquellas que a su vez son las más difíciles de responder. ¿Qué es la inteligencia artificial? ¿Qué sesgos o ideologías políticas propaga, y para quién? ¿Qué coste ambiental tiene? ¿Debería limitarse su uso? Si hace poco Ramón López de Mántaras nos alertaba sobre la desnudez de la inteligencia artificial aprovechando el símil del popular cuento de Andersen [*véase* «El traje nuevo de la inteligencia artificial», por Ramon López de Mántaras; Investigación y Ciencia, julio de 2020], Crawford se ha atrevido a hacer un patrón del traje invisible del emperador. De la sisa a los bajos, ha descosido los dobladillos ocultos de las tecnologías emergentes y ha hilvanado un ensayo que nos empuja al imprescindible enfoque ético de la inteligencia artificial (IA).

Crawford, experta en las implicaciones de la IA y que entre varios cargos académicos es investigadora principal en Microsoft Research, explora territorios conocidos pero no por ello menos inhóspitos. Su *Atlas of AI* escarba en las minas de las tierras raras y en el elevado consumo energético y de agua del que depende el desarrollo de esta tecnología. Destripa la explotación laboral encubierta bajo el halo de las empresas tecnológicas, donde una rebelión en la granja es posible aún. Presenta la necesidad pantagruélica de datos por parte de sistemas tecnológicos insaciables de palabras, imágenes y ubicaciones. Explica el origen de los sesgos en las clasificaciones automáticas, machistas, racistas y xenófobas, como reflejo carrolliano del mundo políticamente incorrecto. Nos deja cara de póquer cuando nos descubrimos como carnaza de los programas que pretenden desvelar nuestras emociones, afectos o tendencias sexuales simplemente analizando los píxeles de nuestros rostros expuestos en las redes sociales. Remueve las relaciones entre los Estados y los poderes fácticos, auténticos controladores del cotarro político y militar que hay tras el interés desmedido en el desarrollo de la IA y, por supuesto, en su blanqueo mediático. Y por último, destruye los mitos y las fantasías que nos venden a las tecnologías emergentes como entes diáfanos, neutros e incorpóreos que generan conocimiento con independencia de sus financiadores, de sus creadores o del entorno natural al que parasitan.

Su estilo metafórico es sugerente y a la par desgarrador, como cuando expone el paralelismo entre el extractivismo de la minería de datos y el de la minería real necesaria para producir la electrónica de la IA. Acto seguido, lejos de quedarse

ahí, ahonda en el símil recordándonos la dureza de las condiciones laborales de los obreros de las grandes corporaciones tecnológicas, los nuevos mineros. Sin llegar al punto incisivo de Simona Levi en *#FakeYou* (Rayo Verde, 2019), el relato de Crawford debería sonar amenazador para la industria tecnológica por las implicaciones sociales de su discurso. Al fin y al cabo, *Atlas of AI* es una crítica desde dentro del mapa. ¿O no trabaja Crawford para Microsoft? ¿Se trata de un ensayo edulcorado? ¿Se ha autocensurado? No da esa sensación, como mínimo en su perspectiva sindical o ecologista; porque logramos lo artificial a costa de lo natural. Por eso, Crawford nos augura un atlas seco, como el de la Tierra sin agua que representó Thomas Burnet en 1694. El relato distópico adquiere trágicos tintes realistas con el paso de las páginas.

No obstante, Crawford cartografía más el presente de la IA que su futuro. Mueve al lector por su atlas suministrándole precisas coordenadas GPS que ilustra con fotografías reveladoras. Sabe quizá que otro plan sería inabordable. Conecta así la perspectiva global con hechos locales, como los conflictos laborales en boga en algunas plantas estadounidenses de Amazon, relacionados en buena medida con la automatización y la expansión de la robótica industrial, y dejando espacio mental a la reflexión del lector. Ella da los puntos cardinales, usted debe imaginar lo que está por venir: únalos.

Pero el libro tampoco mira al pasado más que lo justo para contextualizar. ¿Para qué recuperar a Mercator en la era de Google Maps? Crawford hubiera enriquecido su narrativa tirando del fondo de armario de clásicos como la *Meditación de la técnica* de Ortega y Gasset (1939), ciertamente poco tratado en la literatura anglosajona, o *Darwin among the machines* de Samuel Butler (1863). Pero el *Erewhon* butleriano no aparece en el planisferio de Crawford, y el centauro ontológico orteguiano, o la inexorable relación entre la inteligencia humana y la tecnología, queda como un eco obvio para el lector hispano.

Sin entrar en profundidad en la controversia sobre el dualismo, Crawford se apropia de argumentos filosóficos previos al postular que la IA no es ni inteligente ni artificial. Huye de la metáfora computacional bidireccionalmente: ni el cerebro es un ordenador ni el ordenador será un cerebro, recordando entre líneas a *Las sombras de la mente* de Roger Penrose (Crítica, 1996). Sobre la I de inteligencia (y de «yo» en inglés, por cierto), Crawford reivindica un tono abierto en su discurso, como en la obra polifónica de los años ochenta editada por Douglas Hofstadter y Daniel Dennett *The Mind's I* (Bantam Books, 1982), al incorporar múltiples voces en su atlas. Pero siempre con el objetivo claro de desenmascarar la auténtica realidad social que se oculta tras la ficticia «inteligencia» de la IA. Hay por eso una deliciosa y sutil ironía inicial cuando apela a la inteligencia del caballo Hans para romper el hielo.

Ante la A de artificial, sin embargo, Crawford no da tregua: el ser humano, en su singladura evolutiva, ha modificado su entorno constantemente. Pero mientras que otras tecnologías se nos muestran claramente contaminantes, como la automoción (aunque con intentos de blanqueo últimamente por parte del coche eléctrico), el enorme impacto ecológico de la IA se sigue ocultando a la sociedad.

El realismo de Crawford la aproxima a enfoques sociales como los del investigador Wim Naudé, que ya habían puesto el foco en la incidencia de la IA sobre la desigualdad, y la aleja del alarmismo transhumanista de la singularidad kurzweiliana [*véase* «Más que humanos», por Hyllary Rosner; Investigación y Ciencia, noviembre de 2016] y de sus falsas promesas, bien diseccionados con anterioridad por filósofos como Antonio Diéguez en *Transhumanismo* (Herder, 2017) [*véase* «Transhumanismo: entre el mejoramiento y la aniquilación», por Antonio Diéguez; Investigación y Ciencia, noviembre de 2016].

Crawford es contundente cuando se pregunta, retórica, qué violencia epistemológica es necesaria para que el mundo sea legible para un sistema de aprendizaje automático. Apela así a una reformulación de la filosofía de la tecnología y, en consecuencia, de la tecnoética. También a los problemas derivados de los modelos científicos incompletos bajo los que se programa la IA.

En definitiva, será extraño que el atlas de Crawford les deje indiferentes. Hay todavía mucha tela que cortar del traje del emperador. Los microgestos de su rostro durante la lectura les delatarán ante las cámaras de sus dispositivos electrónicos. *Black mirror*. Las teorías sobre el lenguaje o las expresiones faciales deben mejorarse, pero, mientras tanto, la IA trabaja con ellas. ¿Nos desnuda ella a nosotros mientras la vestimos?

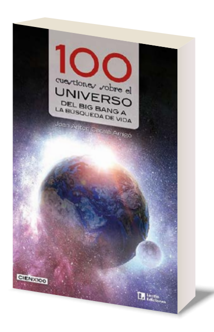
—Antoni Hernández-Fernández
Universidad Politécnica de Cataluña

NOVEDADES

Una selección de los editores de *Investigación y Ciencia*



CON MUCHO GUSTO
UN MENÚ CUAJADO DE HISTORIAS BOTÁNICAS
Eduardo Bazo
Ediciones Cálamo, 2021
ISBN: 978-84-16742-26-4
520 págs. (23,90 €)



100 CUESTIONES SOBRE EL UNIVERSO
DEL BIG BANG A LA BÚSQUEDA DE VIDA
Joan Anton Català Amigó
Ediciones Lectio, 2021
ISBN: 978-84-16918-95-9
208 págs. (14,70 €)



DISPARATES Y GAZAPOS MATEMÁTICOS
José María Sorando Muzás
Catarata, 2021
ISBN: 978-84-1352-249-4
224 págs. (17,50 €)

Recopilación de Mark Fischetti

SEPTIEMBRE

1971

Un ensueño métrico

«El Secretario de Comercio, Maurice Stans, ha remitido al Congreso una propuesta para que EE.UU. adopte el sistema métrico. La propuesta recoge las recomendaciones de la Agencia Nacional de Pesas y Medidas, que presenta esta conversión como "una decisión que ya debe tomarse". EE.UU. es el único país de peso que ni usa el sistema métrico ni se propone pasarse a él. "De cara a nuestros intereses en el comercio mundial, se diría deseable una América usuaria del sistema métrico", señala la agencia. De admitir la propuesta, el Congreso fijará una fecha tope a 10 años vista. De muy alta prioridad sería enseñar a pensar en términos métricos a los niños y a la población. En la fecha tope, EE.UU. podría convertirse de modo predominante, aunque no exclusivo, en un país métrico. Presumiblemente, los avances y retrocesos en el fútbol americano seguirán midiéndose en yardas.»

Radicales galácticos

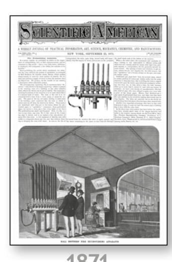
«La misma molécula simple descubierta hace ocho años en los confines interestelares de nuestra galaxia se ha detectado en el interior de otras dos galaxias distantes unos 10 millones de años luz. Se trata del radical hidroxilo, OH. La radiointerferometría muestra su presencia en M82, una galaxia explosiva en la constelación de la Osa Mayor, y en Nee253, una pequeña galaxia espiral en el Escultor. Evidentemente, en las nubes interestelares hay alrededor de un radical hidroxilo por cada millón de átomos de hidrógeno, más o menos como en nuestra galaxia.»



1971



1921



1871

1921

Radioseñales de Marte

«Las radioseñales marcianas se repiten cada pocos años. La prensa anuncia en titulares que se han captado unas señales misteriosas. J. H. C. Macbeth, gerente londinense de la Compañía de Telégrafo Inalámbrico Marconi, Ltda., afirmó en un discurso reciente que William Marconi estaba ya convencido de que había interceptado unas señales, y que estas eran de muy alta longitud de onda. Sea como sea, cuesta creerlo. El desarrollo de la comunicación por radio es tan complejo que sin duda sería muy raro que dos personas, situadas en planetas distintos, hubieran dado exactamente con el mismo método de comunicación. Nos es más fácil creer que los marcianos usen unos espejos gigantescos para reflejar la luz, e incluso reflectores gigantescos, como medios de atraer nuestra atención.»

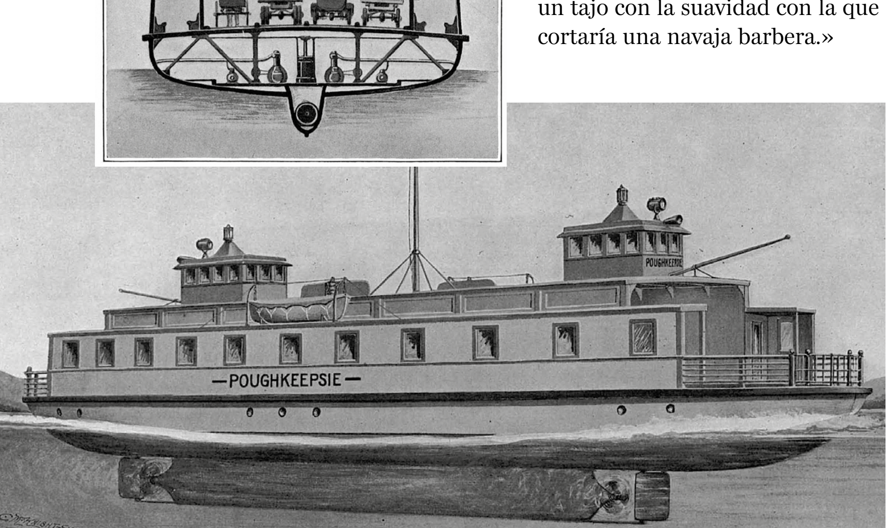
Scientific American pasa a ser mensual

«Anuncio: La publicación semanal *Scientific American* y *Scientific American Monthly* van a combinarse en una única revista mensual, *Scientific American*. Su primer número saldrá en noviembre de 1921. La nueva publicación contendrá más material de lectura, más ilustraciones y una temática más amplia. Confesamos que, tras editar *Scientific American* una semana tras otra durante más de tres cuartos de siglo, sentimos una punzada de pesar. Pero nuestro objetivo es presentar el mismo material en un formato más equilibrado y mejor compendiado, y a un precio más bajo para el lector. La nueva revista abarcará todas las ramas de la ciencia, la investigación, la ingeniería y los avances industriales. El precio de la suscripción será de 4,00 dólares anuales, y de 35 centavos el de los ejemplares sueltos.»

1871

Peces agresivos

«Entre los habitantes de las aguas de nuestro planeta hay criaturas hermosas, ridículas y terribles. Entre estas últimas se cuenta la escorpina. Esta inflige lesiones con su aleta dorsal dentada, y hasta que la misma no se quiebra con un garrote o un palo nadie se atreve a tocarla. De un pez llamado "candirú" se dice que infesta la desembocadura del Amazonas; apenas más largo que el foxino, cuando este pequeño diablo se aferra a la carne, lo hace con tal tenacidad que no es posible desprenderlo sin que arranque un bocado. Otro pez de los ríos suramericanos es la "payara", cuya mandíbula inferior lleva dos colmillos que abren un tajo con la suavidad con la que cortaría una navaja barbera.»



1921: Ferri de vehículos. La expansión de los automóviles de turismo y de los camiones de transporte de cargas ha dado como resultado el Hullfin, un nuevo tipo de transbordador. Con solo 12,7 metros de eslora, ofrecerá 144 metros de acceso a los vehículos.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXXV, N.º 12, 17 DE SEPTIEMBRE DE 1921

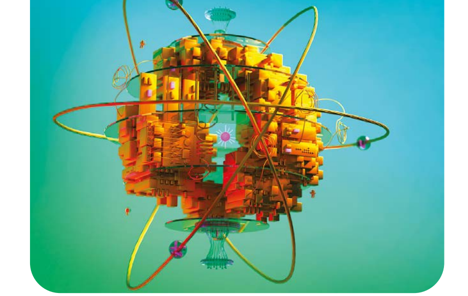
ETOLOGÍA

¿Por qué juegan los animales?

Caitlin O'Connell

Retozar mejora la condición física y la cognición, lo que permite a los animales desarrollar las habilidades necesarias para sobrevivir y reproducirse.





COMPUTACIÓN CUÁNTICA

Una nueva química cuántica

Jeannette M. Garcia

Los ordenadores cuánticos prometen revolucionar la modelización de los procesos moleculares.



ASTRONOMÍA

Enanas marrones

Katelyn Allers

El eslabón perdido entre las estrellas y los planetas.

NEUROCIENCIA

La respuesta inmunitaria en el alzhéimer

Jason Ulrich y David M. Holtzman

La microglía, un tipo de células inmunitarias del cerebro, contribuye a la progresión del alzhéimer. El conocimiento detallado sobre su influencia ha ayudado a plantear nuevos tratamientos para la enfermedad.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas

EDICIONES
Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz

DIRECTOR DE MÁRQUETIN Y VENTAS
Antoni Jiménez Arnay

DESARROLLO DIGITAL
Marta Pulido Salgado

PRODUCCIÓN
M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau

SECRETARÍA
Eva Rodríguez Veiga

SUSCRIPCIONES
Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S. A.
Valencia, 307 3.º 2.ª
08009 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF Laura Helmuth
PRESIDENT Stephen Pincock
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Valencia, 307 3.º 2.ª
08009 Barcelona

PUBLICIDAD

Prensa Científica, S. A.
Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

ATENCIÓN AL CLIENTE

Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Javier Grande: *Apuntes*, *Un debate global sobre las megaconstelaciones de satélites* y *Una nueva manera de acelerar partículas*; Andrés Martínez: *Apuntes*, *El primer libro de fotografías de botánica* y *Los riesgos de los microplásticos*; Anna Romero: *Las semillas antiguas revelan secretos de la evolución de las plantas con flores*; M. A. Vázquez Mozo: *¿Qué es una partícula elemental?* y *Un nuevo mapa de las partículas y las interacciones*; Alfredo Marcos: *Los signos y el significado en la naturaleza*; Pedro Pacheco: *¿Debe ser neutral la ciencia?*; M. Gonzalo Claros: *Proteínas artificiales*; José O. Hernández Sendín: *Las rocas de carbono de Omán*; Lorenzo Gallego: *La sed humana*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotimpres - Pla de l'Estany s/n - Pol. Ind. Casa Nova
17181 Aiguaviva (Girona)

Printed in Spain - Impreso en España